U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

INTEGRAÇÃO DE METODOLOGIA BIM COM FERRAMENTAS DE IMPRESSÃO 3D

JOÃO OLIVEIRA RAMOS TROCADO FERREIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor João Pedro da Silva Poças Martins

Coorientador: Engenheiro André Giestas Cancela Monteiro

JUNHO DE 2019

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2018/2019

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2018/2019 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

The more I see, the less I know for sure.

John Lennon

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado marcou o final do meu percurso enquanto estudante. A todos que me auxiliaram, dirijo este agradecimento.

À Bimtecnologias agradeço pela oportunidade concedida, sem dúvida permitiram-me desenvolver um tema do meu interesse, com todos os recursos necessários ao meu dispor.

Ao meu co-orientador Engenheiro André Monteiro pela disponibilidade, acompanhamento e exigência que demonstrou ao longo de todo projeto, sem dúvida essencial para o bom desenrolar do trabalho.

Ao meu orientador Professor Doutor João Poças Martins pelo conhecimento, simpatia e motivação que me ajudou a explorar ao máximo este tema.

À minha namorada Mariana pelo apoio, pela simpatia e pela paciência que demonstrou ao longo destes últimos anos, sem dúvida essencial.

Aos meus amigos da FEUP pelas conversas, pelos apontamentos e pelos almoços que tanto contribuíram para o meu conhecimento futebolístico.

Ao pessoal de Gondomar por todos os cafés e noitadas de FIFA que tanto ajudaram a encher-me de moral.

Por fim, mas não com menos importância, gostaria de agradecer a toda a minha família que sempre esteve do meu lado desde o início. Aos meus pais, pela educação e pelo apoio que sempre demonstraram. Aos meus avós por todo carinho e incentivo. Um obrigado especial ao meu avô materno que tanto contribuiu e que infelizmente não pôde estar presente nestes últimos anos.

A todos os outros que de alguma forma me ajudaram e não estão mencionados, um obrigado!

RESUMO

Nos últimos anos a introdução da metodologia BIM (*Building Information Modelling*) reinventou a Indústria da Construção (IC). A partir da sua implementação o fluxo de trabalhos alterou-se e generalizou-se o uso da modelação em três dimensões da geometria de edifícios. Paralelamente, a impressão 3D evoluiu e diversificou-se no mercado, permitido uma utilização transversal aos vários setores. Criaram-se assim as condições necessárias para conciliar os dois conceitos.

Na presente dissertação de mestrado o objetivo traçado consistiu no desenvolvimento de uma ferramenta de adaptação de modelos BIM para o processo de trabalho da impressão 3D. Para tal estudou-se detalhadamente as diversas vertentes da impressão 3D e avaliou-se quais os principais ajustes a introduzir na fase de preparação.

Tendo em vista a compreensão dos vários aspetos da impressão, uma tecnologia manifestamente desconhecida na IC, procurou-se assimilar as características principais das diversas tecnologias existentes no mercado, assim como do processo de trabalho utilizado. Por este motivo, neste documento estão descritas as especificações de cada uma das técnicas desenvolvidas e o correspondente princípio de funcionamento.

Com vista a implementar um método eficiente e expedito, desenvolveram-se diversos processos de preparação de modelos BIM, nos quais é executada uma verificação, análise e manipulação da sua geometria. Com isto pretende-se não só gerir o modelo, como modificá-lo e adaptá-lo às limitações da própria impressora e à utilização ambicionada. Para analisar os efeitos práticos deste procedimento, são estudados dois casos tipologicamente diferentes que colocam à prova vários dos processos criados.

A utilização de ferramentas de impressão com o auxílio da metodologia BIM poderá revelar-se bastante útil no futuro, nomeadamente como complemento do próprio BIM, na prototipagem ou até mesmo numa utilização direta em obra.

PALAVRAS-CHAVE: IMPRESSÃO 3D, MODELO, BIM, INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, PROCESSO DE TRABALHO.

ABSTRACT

Over the last few years, BIM (Building Information Modelling) reinvented the Construction Industry (CI). With its implementation the traditional design workflow changed, and it now relies heavily on three-dimensional modelling of building geometries. Parallelly, the practical applications of 3D printing evolved and diversified, allowing for a wide range of uses in various sectors. Due to the complimentary nature of these concepts and given their current maturity level, the stage is set to study actual practical applications of the combination of these processes.

In this master dissertation, the main goal consisted in the development of a 3D printing workflow – BIM adaptation tool. For that, all the different 3D printing's features were studied in detail, as well as the main variations to add in the preparation phase.

Keeping in mind the comprehension of the several aspects of 3D Printing, a technology relatively unknown in the CI, this study aimed to get to know about the main features of the available technologies in the market, as well as their workflow. For this reason, the technical specifications of the different techniques developed, and their working principles are explained.

To implement an efficient and smart method, several BIM model preparation mechanisms were added, on which can be executed an element verification and analysis and a geometry manipulation. This process not only allows to manage the model, but also to modify and adapt it to the user's intentions or even to the printer's limitations. In order to evaluate effectiveness of this mechanisms, two typologically different models are tested, and their results discussed.

The use of 3D printing tools with the contribution of BIM programs can turn out to be very helpful in the future, namely, in complementing BIM experience, prototyping or even in construction.

KEYWORDS: 3D Printing, Model, BIM, Construction Industry, Workflow.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS I
RESUMO III
ABSTRACT V

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL 1
1.2. MOTIVAÇÃO 1
1.3. OBJETIVOS 2
1.4. ORGANIZAÇÃO 2

2. ESTADO DA ARTE 5
2.1. IMPRESSÃO 3D 5
2.1.1. INTRODUÇÃO À IMPRESSÃO 3D 5
2.1.1.1. Conceito 5
2.1.1.2. Evolução histórica 5
2.1.1.3. Fabricação aditiva vs Fabricação subtrativa 6
2.1.2. TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D 7
2.1.2.1. Fotopolimerização de Resina – *Vat Photopolymerization* (VP) 7
2.1.2.2. Extrusão de material – *Material Extrusion* (ME) 8
2.1.2.3. Jato de Material – *Material Jetting* (MJ) 10
2.1.2.4. Jato de Aglutinante - *Binder Jetting* (BJ) 11
2.1.2.5. FUSÃO DE CAMA DE PÓ - *POWDER BED FUSION* (PBF) 12
2.1.2.6. Deposição por Energia Direcionada - *Direct Energy Depositon* (DED) 14
2.1.2.7. Construção por Laminados - *Sheet Lamination* (SL) 15
2.1.2.8. Comparação das tecnologias 16
2.1.3. COMPRAR OU SUBCONTRATAR? 18
2.1.4. PROCESSO 19
2.1.4.1. Processo de trabalho 19
2.1.4.1.1. Pré-Processamento 20
2.1.4.1.2. Pós-Processamento 22
2.1.4.2. Aplicações utilizadas 23
2.1.4.2.1. Modelação 23
2.1.4.2.2. Slicing 24
2.1.5. APLICAÇÕES DE 3DP NA CONSTRUÇÃO 24

2.1.5.1. Para Maquetes 24
2.1.5.2. Para Construção 25
2.2. BIM 28
2.2.1. INTRODUÇÃO 28
2.2.2. DOMÍNIOS DE APLICAÇÃO 28
2.2.2.1. Modelação para projeto e preparação de obra 28
2.2.2.2. Modelação para pré-fabricação 29
2.2.2.3. Modelação para construção 30
2.2.2.4. Modelação para utilização 30
2.2.3. WORKFLOWS PARA A IMPRESSÃO 3D 31

3. DO BIM À IMPRESSÃO 3D: PROPOSTA DE PROCESSO DE TRABALHO 33
3.1. INTRODUÇÃO 33
3.2. PREPARAÇÃO DO MODELO PARA IMPRESSÃO 35
3.2.1. SELEÇÃO E UNIÃO DO MODELO 37
3.2.1.1. Seleção dos elementos 37
3.2.1.2. Verificação dimensional dos elementos 39
3.2.1.3. Análise de Integridade – União do modelo 41
3.2.1.3.1. Importação a partir de geometria 42
3.2.1.3.2. Importação direta do Revit 42
3.2.2. MODELO MACIÇO 43
3.2.3. DIVISÃO DO MODELO 46
3.2.3.1. Por Piso 46
3.2.3.2. Por *Grid* 47
3.2.3.3. Por *Scope Box* 50
3.2.3.3.1. Outras Operações 53
3.2.3.3.1.1. Redução do modelo. 53
3.2.3.3.1.2. União de várias *Scope Box.* 53
3.2.3.4. Por Caixa 54
3.2.3.5. Comparação dos métodos de divisão de modelos para impressão 58
3.2.4. ADIÇÃO DE ESTRUTURAS DE FIXAÇÃO 59
3.2.4.1. Criação da estrutura de fixação 59
3.2.4.1.1. Fixador parametrizado no Revit 59
3.2.4.1.2. Fixador parametrizado no Dynamo 60
3.2.4.2. Colocação das estruturas de fixação 61

3.2.4.2.1. Introdução manual das estruturas de fixação 61
3.2.4.2.2. Introdução automática de estruturas de fixação 63
3.2.5. IMPRESSÃO A CORES 67
3.2.5.1. Multi-cor / Multi-Material 68
3.2.5.1.1. Processo de preparação de impressão multi-cor manual 68
3.2.5.1.2. Processo de preparação de impressão multi-cor automática 68
3.2.5.2. *Full-color* 70
3.2.6. EXPORTAÇÃO DO MODELO 71
3.3. PREPARAÇÃO DA IMPRESSÃO 72
3.3.1. DEFINIÇÃO DA ESCALA E DA ORIENTAÇÃO DO MODELO 72
3.3.2. DEFINIÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES DA IMPRESSÃO 72
3.3.3. GERAÇÃO DE SUPORTES 73
3.3.4. CORTE DO MODELO EM CAMADAS 73
3.4. PÓS-PROCESSAMENTO 73

4. CASO DE ESTUDO 75

4.1. INTRODUÇÃO 75
4.2. CASO DE ESTUDO 1: EDIFÍCIO DE HABITAÇÃO 75
4.2.1. APRESENTAÇÃO DO PROJETO 75
4.2.2. OBJETIVOS 76
4.2.3. DESENVOLVIMENTO 76
4.2.3.1. Pré-processamento 76
4.2.3.1.1. Preparação do Modelo 76
4.2.3.1.2. Preparação da impressão 80
4.2.4. RESULTADOS 82
4.3. CASO DE ESTUDO 2: TUBO DE VENTILAÇÃO 83
4.3.1. APRESENTAÇÃO DO PROJETO 83
4.3.2. OBJETIVOS 83
4.3.3. DESENVOLVIMENTO 84
4.3.3.1. Pré-processamento 84
4.3.3.1.1. Preparação do Modelo 84
4.3.3.1.2. Preparação da impressão 87
4.3.3.2 Impressão 89
4.3.3.3. Pós-processamento 90
4.4.4. RESULTADOS 91
4.4.4.1. Pré-processamento 91

4.4.4.2. Impressão e Pós-processamento 93
4.4. ANÁLISE DO PROCESSO DE TRABALHO 93

5. CONCLUSÕES FINAIS E FUTURO DA IMPRESSÃO 3D NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO 97

5.1. CONCLUSÕES FINAIS 97
5.1.1. PREPARAÇÃO DO MODELO 97
5.1.2. IMPRESSÃO 98
5.2. FUTURO DA IMPRESSÃO 3D NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO 99
5.2.1. EVOLUÇÃO DO PROCESSO DESENVOLVIDO 99
5.2.2. CRIAÇÃO DE ARMAZÉM VIRTUAL DE GEOMETRIAS 99
5.2.3. CRIAÇÃO DE BIBLIOTECA VIRTUAL BIM-3DP 100

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 101

ANEXO 107

A: SCRIPTS DE DYNAMO 109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema (adaptado) do processo de fabrico por impressão 3D, CNC e moldagem por injeção, respetivamente [9]. 6
Figura 2 – Esquema (adaptado) comparativo da evolução do custo em função da quantidade de produção [11]. 7
Figura 3 - Exemplo de funcionamento de impressora VP, nomeadamente do tipo SLA [14]. 8
Figura 4 - Esquema de funcionamento da impressão do tipo ME [22]. 9
Figura 5 - Esquema de funcionamento MJ [28]. 10
Figura 6 - Esquema de funcionamento das impressoras BJ [35]. 12
Figura 7 - Esquema de funcionamento das impressoras PBF [37]. 13
Figura 8 - Esquema de funcionamento das impressoras do tipo DED [42]. 14
Figura 9 - Esquema de funcionamento das impressoras do tipo SL [47]. 15
Figura 10 - Esquema do percurso do processo de impressão [61]. 19
Figura 11– Exemplo de conversão para STL [65] 20
Figura 12 - Exemplo de estrutura na formato retangular, impressa com diferentes percentagens de preenchimento interior (20%, 50% e 75%, respetivamente) [66]. 21
Figura 13 – Exemplo de colocação de estrutura de suporte para diferentes orientações de impressão [60]. 21
Figura 14 – Pós-processamento de uma impressão FDM [70]. 22
Figura 15 – Modelos de estruturas de edifícios [77]. 25
Figura 16 – Modelo desmontável [77]. 25
Figura 17 – Fotografia de impressora *Binder Jetting* de grande dimensão, D-Shape [86]. 26
Figura 18 - Esquema de uma impressora do tipo *Contour Crafting [89]*. 27
Figura 19 – O processo BIM ao longo do ciclo de vida de um edifício [97]. 28
Figura 20 – Curva de MacLeamy [97]. 29
Figura 21 - Esquema do processo de impressão 3D para modelos BIM abordado neste capítulo. 34
Figura 22 – Fluxograma do processo de preparação do modelo BIM para impressão 3D. 35
Figura 23 – Janela "*Parameter Properties"* no Revit. 37
Figura 24 – Janela de criação do filtro de visualização, no Revit. 38
Figura 25 – Configuração dos filtros de visualização. 38
Figura 26 – Modelo 3D com os filtros de visualização ativos. 38
Figura 27 – *Script* de verificação dimensional. 39
Figura 28 – Excerto do *script* de verificação dimensional. 40
Figura 29 - Excerto de *script* de verificação dimensional. 41
Figura 30 – Modelo antes e depois da união dos elementos. 41
Figura 31 – Panorama geral de um exemplo de um Script com união de elementos. 42
Figura 32 – Exemplo de importação geométrica, a partir de ficheiro "SAT". 42
Figura 33 –Exemplo de importação direta de elementos Revit pela sua seleção no projeto. 43
Figura 34 – Exemplo de processo de filtragem de geometria sólida. 43
Figura 35 – Exemplo de percurso de impressão de tecnologia FDM para modelo simples e modelo maciço, respetivamente. 44
Figura 36 – Exemplo de "*Room*" modelado no Revit. 45
Figura 37 – *Script* de Criação de Modelo Maciço. 45
Figura 38 – Corte e Vista 3D de Sólido resultante no *Revit*. 45
Figura 39 – Panorama geral do *script* de divisão por piso, a detalhar na imagem seguinte e em anexo. 46
Figura 40 – Excerto do *script* de divisão de modelo por piso. 46
Figura 41 - Exemplo de peça obtida por divisão por piso. 47
Figura 42 – Vista em planta da colocação dos eixos *grid* e em 3D no Dynamo. 48
Figura 43 – Planos e sólidos formados a partir da marcação dos eixos *grid*. 48
Figura 44 – Gráficos demonstrativos da região (a verde) selecionada no plano horizontal para a intersecção ou reunião. 49
Figura 45 - Excerto do *Script* de secção por reunião e o sólido resultante. 50
Figura 46 – Excerto do *script* de secção por intersecção e o respetivo sólido resultante. 50
Figura 47 – Exemplo de *scope box* definida no Revit. 51

Figura 48 – Arestas da *scope box*. 51
Figura 49 – *Cuboid* coincidente com a *Scope Box*. 52
Figura 50 – Modelo e volume da *Scope Box*, antes e após a sua intersecção. 52
Figura 51 - Redução de modelo a partir de *scope box*. 53
Figura 52 – Excerto do *script* de união de *Scope Boxes*. 54
Figura 53 – Parâmetros de dimensionamento de caixa de corte. 55
Figura 54 - Pontos e plano criados a partir da *bounding box*. 55
Figura 55 – Exemplo de criação de caixa de seleção para o Nível 1, Lado da caixa 1 e para os comprimentos relativos de 0,7; 0,7 e 0,3 para os eixos X, Y e Z, respetivamente. 56
Figura 56 - Sobreposição da caixa de seleção colorida a azul com o modelo original a cinzento. 56
Figura 57 – Representação da seleção e redução de uma secção do modelo através do método de divisão por caixa de seleção, à esquerda e à direita respetivamente. 57
Figura 58 – Dimensionamento da secção horizontal do fixador retangular. 60
Figura 59 – Fixador redimensionado e colocado, manualmente, num modelo. 60
Figura 60 – Excerto de *script* de criação de fixador parametrizado no Dynamo. 60
Figura 61 – Janela de propriedades de um fixador parametrizado no Revit. 61
Figura 62 - Exemplo de modelo dividido por piso com adição totalmente manual de fixadores. 62
Figura 63 - Excerto do *script* de colocação manual dos fixadores. 63
Figura 64 - Excerto do *Script* de colocação automática de fixadores. 64
Figura 65 - Excerto do *Script* de colocação automática dos fixadores. 64
Figura 66 – Vista 3D das *PolySurfaces* (à esquerda) e das faces superiores (à direita) dos pilares estruturais e um modelo BIM. 65
Figura 67 – Pontos de referência para a colocação dos fixadores e aberturas. 65
Figura 68 – Processo de adição/criação dos fixadores sobre os pontos referenciados. 66
Figura 69 – Exemplo de modelo com adição de fixadores e de aberturas, respetivamente. 66
Figura 70 – Verificação de divisão no primeiro nível. 67
Figura 71 – Verificação de divisão no último nível. 67
Figura 72 - Exemplo de objeto impresso manualmente a cores [99]. 68
Figura 73 – Janela de criação de parâmetro no Revit. 69
Figura 74 – Janela de criação de filtros de visualização. 69
Figura 75 – Janela de gestão dos filtros de visualização. 70
Figura 76 - Exemplo de modelo para impressão multi-cor automática. 70
Figura 77 – Exemplo de modelo preparado para impressão multi-cor. 70
Figura 78 - Exemplo de modelo 3D com colorização *full-color*. 71
Figura 79 - Janela de exportação STL no Revit. 71
Figura 80 - Exemplo de impressão com a orientação base e com a orientação otimizada 72
Figura 81 – Vista 3D do projeto do edíficio do caso de estudo nº1. 76
Figura 82 – Exemplo de elementos aprovados segundo as suas dimensões. 77
Figura 83 – Conjunto de elementos reprovados à verificação dimensional. 77
Figura 84 – Modelo resultante da seleção para impressão. 78
Figura 85 – Vista em planta de um piso do edifício com atribuição de *Rooms*. 78
Figura 86 – Modelo com as *scope box*es correspondentes à divisão em estudo. 79
Figura 87 – Modelo dividido exportado, encaixado e separado, à esquerda e direita respetivamente. 80
Figura 88 – Vista 3D do projeto de estudo. 83
Figura 89 – Nó de importação de elementos à esquerda e resultado da verificação dimensional à direita. 84
Figura 90 – Elemento reprovado na verificação dimensional segundo as suas dimensões e volume. 84
Figura 91 – Modelo com os elementos selecionados para a impressão. 85
Figura 92 – Modelo com as respetivas caixas de divisão. À esquerda modelo dividido pelas juntas, à direita o modelo dividido longitudinalmente. 85
Figura 93 – Secção transversal do fixador, representada a verde, e da respetiva abertura, representada a branco. 86
Figura 94 – Modelo do tubo de ventilação com as diferentes peças encaixadas. 86
Figura 95 – Modelos do tubo de ventilação com as peças separada. Divisão pelas juntas à esquerda, divisão longitudinal à direita. 87
Figura 96 – Fotografia do processo de impressão tirada pelo operador da impressão. 90
Figura 97 - Peça nº 1 da divisão por junta do caso de estudo nº2, impressa em ABS, PLA e resina, representadas da esquerda para a direita, respetivamente. 91

Figura 98 - Peça nº1 da divisão longitudinal do caso de estudo nº2, impressa em PLA. 91
Figura 99 – Peça nº2 do modelo de divisão por juntas de dilatação. 92
Figura 100 – Comparação de detalhe de impressão da peça nº2 do modelo de divisão por juntas de dilatação para a configuração 1 e 7 da divisão por juntas. 92
Figura 101 – Peça nº2 do modelo de divisão por junta, impresso em FDM, PLA e espessura de 100 μm. 93
Figura 102 – Panorama geral do *script*. 109
Figura 103 – Importação dos elementos por seleção manual. 110
Figura 104 – Importação dos elementos do projeto. 110
Figura 105 – Especificação dos requisitos de impressão e verificação das dimensões dos elementos do projeto. 111
Figura 106 – Verificação da capacidade de imprimir o volume. 111
Figura 107 - Atribuição de valor positivo no parâmetro de verificação de volume do elemento. 112
Figura 108 - Atribuição de valor negativo no parâmetro de verificação das dimensões do elemento. 112
Figura 109 – Panorama geral do *script* de união. 112
Figura 110 – Importação por categorias Revit. 113
Figura 111 – Importação de modelo no formato geométrico. 113
Figura 112 – Seleção dos elementos sólidos. 114
Figura 113 – União dos sólidos. 114
Figura 114 – Panorama geral de massificação de um modelo. 114
Figura 115 – Importação de categorias Revit. 115
Figura 116 – Seleção dos elementos sólidos. 115
Figura 117 – Panorama geral do *script* de divisão por piso. 115
Figura 118 – Importação dos elementos por nível. 116
Figura 119 – Categorias a remover do processo de divisão. 116
Figura 120 – Seleção dos elementos sólidos. 117
Figura 121 – Panorama geral do *script* de divisão por *grid*. 117
Figura 122 – Seleção de nível e importação de elementos Revit. 117
Figura 123 – Seleção dos elementos a remover do modelo. 118
Figura 124 – Seleção dos elementos sólidos. 118
Figura 125 - Importação das *grid* e definição dos volumes de seleção. 118
Figura 126 - Cálculo da altura do modelo processado. 119
Figura 127 – Criação de volume de seleção. 119
Figura 128 - Reunião de volume criado a partir de *grid*. 120
Figura 129 - Criação de volume a remover ao modelo original. 120
Figura 130 - Intersecção de modelo por divisão por *grid*. 120
Figura 131 – Panorama geral do *script* de divisão por *Scope Box*. 121
Figura 132 – Importação de modelo geométrico. 121
Figura 133 – Seleção dos elementos sólidos. 121
Figura 134 – Importação da *Scope Box*. 122
Figura 135 – Criação de volume de seleção. 122
Figura 136 – Intersecção da *scope box* com a geometria do modelo. 123
Figura 137 – Panorama geral de importação de sólido inverso à seleção de *Scope Box*. 123
Figura 138 – Remoção do volume correspondente à seleção da *Scope Box*. 123
Figura 139 – Panorama geral do *script* de seleção de várias *scope boxes*. 124
Figura 140 – Importação das várias *Scope Boxes*. 124
Figura 141 – Criação dos vários volumes de seleção. 124
Figura 142 – Fusão dos vários volumes num volume apenas. 125
Figura 143 – Panorama geral do *script* da divisão do modelo por caixa. 125
Figura 144 – Importação e seleção dos elementos sólidos do projeto remover *Solid.ByUnion*. 125
Figura 145 – Seleção das especificações da caixa de corte. 126
Figura 146 – Primeira etapa da criação de limites da caixa de corte. 126
Figura 147 – Criação de limites de caixa de seleção. 127
Figura 148 – Criação de limites de caixa de seleção. 127
Figura 149 – Criação de caixa de corte. 128
Figura 150 – Exemplo de ferramenta de remoção da caixa de seleção 128
Figura 151 – Panorama geral do *script*. 129

Figura 152 – Exemplo de importação dos elementos. 129
Figura 153 – Seleção da geometria dos fixadores. 129
Figura 154 – Processo de redimensionamento dos fixadores. 130
Figura 155 – Operação de remoção dos volumes das aberturas. 130
Figura 156 – Panorama geral do *script*. 130
Figura 157 – Listagem do piso a dividir. 131
Figura 158 – Verificação da lista de divisão. 131
Figura 159 – Seleção de categorias a não incluir na divisão. 132
Figura 160 – Seleção dos elementos a incluir e dos respetivos elementos sólidos. 132
Figura 161 – Seleção dos elementos base para a colocação de fixadores/aberturas. 132
Figura 162 – Verificação de último nível. 133
Figura 163 – Verificação de primeiro nível. 133
Figura 164 – Processo de determinação do ponto base de colocação de fixadores/aberturas. 134
Figura 165 - Processo de determinação do ponto base de colocação de fixadores/aberturas (Parte 1). 134
Figura 166 - Processo de determinação do ponto base de colocação de fixadores/aberturas (Parte 2). 134
Figura 167 – Medidas do fixador parametrizado no Revit. 135
Figura 168 – Criação de fixador parametrizado no Revit. 135
Figura 169 – Verificação de presença de fixadores no modelo dividido. 135
Figura 170 – Ferramenta de subtração utilizada para a criação de aberturas. 136
Figura 171 – Verificação da colocação das aberturas no modelo dividido. 136

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens de cada tecnologia de impressão 3D [48, 49]. 16
Tabela 2 – Quadro ilustrativo das características de uma impressora de gama baixa para cada tipo de tecnologia. 17
Tabela 3 – Vantagens e desvantagens de comprar e de subcontratar [59]. 19
Tabela 4 - Vantagem e desvantagens dos métodos de divisão. 58
Tabela 5 – Valores exemplificativos dos parâmetros de impressão. 81
Tabela 6 – Figuras correspondentes a um detalhe exemplificativo da configuração. 81
Tabela 7 - Valores exemplificativos dos parâmetros de impressão. 88
Tabela 8 – Figuras correspondentes a um detalhe exemplificativo da peça nº3 da divisão pelas juntas de dilatação para cada uma das configurações. 88
Tabela 9 – Configurações e resultados das impressões do caso de estudo nº2. 89

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

€ - Euro

£ - Libra Esterlina

$ - Dólar dos Estados Unidos

% - Percentagem

m – Metro

mm – Milímetro

μm – Micrómetro

mm/h – Milímetro por Hora

DPI – *Dots per Inch* (Ponto por Polegada)

2D – Duas Dimensões

3D – Três Dimensões

3DP – *Three Dimensional Print* ou *Three Dimensional Printing* (Impressão a três dimensões)

3MF – *Three-Dimensional Manufacturing Format*

4D – Quatro Dimensões

5D – Cinco Dimensões

ABS – *Acrylonitrile Butadiene Styrene*

AEC – Arquitetura, Engenharia e Construção

AM – *Additive Manufacturing*

BIM – *Building Information Modelling*

BJ – *Binder Jetting*

CAD – *Computer Aided Design*

CC – *Contour Crafting*

CLIP – *Continuous Light Interface Production*

CNC – *Computer Numerical Control*

DED – *Direct Energy Deposition*

DLP – *Digital Light Processing*

DMLS – *Direct Metal Laser Sintering*

DOD – *Drop On Demand*

EBAM – *Electron Beam Additive Manufacturing*

EBM – *Electron Beam Melting*

FDM – *Fused Deposition Method*

FFF – *Fused Filament Fabrication*

Fig – Figura

IC – Indústria da Construção, em inglês CI (Construction Industry)

LENS – *Laser Engineering Net Shape*

LOM – *Laminated Objecrt Manufacturing*

LS – *Laser Sintering*

MDM – *Material Deposition Method*

ME – *Material Extrusion*

MJ – *Material Jetting*

mLS – *Metal Laser Sintering*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

NPJ – *NanoParticle Jetting*

OBJ – *Object (file)*

PA – *Polyamide*

PBF – *Powder Bed Fusion*

PLA – *Polylactic Acid*

pLS – *Polymer Laser Sintering*

PMMA – *Polymethyl Methacrylate*

RP – *Rapid Prototyping*

RT – *Rapid Tooling*

SL – *Sheet Lamination*

SL – *Stereolithography*

SLA – *Stereolithography Apparatus*

SLM – *Selective Laser Melting*

SLS – *Selective Laser Sintering*

STL (ficheiro) – *Stereolithography* ou *Standard Tessellation Language* ou *Standard Triangle Language*

TPE – *Thermoplastic Elastomer*

TPU – *Thermoplastic Polyurethane*

UV – Ultravioleta

VP – *Vat Photopolymerization*

VRML – *Virtual Reality Modelling Language*

X3D – *Extensible Three-Dimensional*

1
INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

A Indústria de Construção passou por várias transformações ao longo da sua história. Nos últimos anos o setor reinventou-se com a introdução da metodologia BIM nas diversas fases do ciclo de vida de um edifício. Similarmente, a tecnologia associada à impressão 3D evoluiu, tornou-se mais acessível no mercado e consequentemente, o seu uso tornou-se mais transversal às diversas indústrias.

A impressão 3D é um processo de fabrico aditivo cujo princípio se baseia na criação de objetos a partir da sobreposição de material em camadas. Este inicia-se a partir de um modelo 3D digital, que uma vez preparado com *software* dedicado é dividido em camadas e impresso. Apesar de ser uma tecnologia desenvolvida há já várias décadas, o seu uso apenas se generalizou com os avanços da modelação tridimensional.

O *Building Information Modeling,* ou simplesmente BIM, é o termo utilizado para descrever um conceito de gestão de informação de edifícios durante as fases de projeto, construção e operação. Através da manipulação da geometria num ambiente tridimensional e da informação associada, os diferentes responsáveis intervenientes conseguem gerir todos os dados referentes às diferentes especialidades de modo estruturado.

O desenvolvimento que nos últimos anos a metodologia BIM introduziu no setor da construção permitiu estender o uso de programas preparados para gerar e manipular geometrias 3D. Por outro lado, os avanços nas tecnologias de impressão 3D possibilitaram a criação de objetos mais diversificados, tanto a nível de material como de geometria. Esta realidade permite compatibilizar as duas tecnologias e criar um possível mercado na indústria da construção civil dedicado à impressão 3D.

1.2. MOTIVAÇÃO

A Engenharia Civil está inserida numa indústria singular. A unicidade de cada projeto faz com que em cada obra, o protótipo seja também o próprio produto final, ao contrário do que se verifica noutras indústrias, de produção em série. Esta singularidade é uma das razões da dificuldade da adoção de novas técnicas e tecnologias na construção.

O aparecimento e o progresso das tecnologias BIM que se registou nos últimos anos, assim como a evolução dos dispositivos de impressão 3D, mais acessíveis e precisos, permite equacionar a utilização dos recursos disponibilizados pelos programas BIM no desenvolvimento de modelos impressos.

Por estas razões, a integração da metodologia BIM com ferramentas de impressão 3D foi o tema escolhido para esta dissertação. A informação gerida num edifício modelado num ambiente

tridimensional, complementado com a maneabilidade e representação visual de uma impressão 3D poderão potenciar a compreensão de aspetos específicos de cada projeto, na comunicação, na coordenação e na componente comercial de uma obra. O desenvolvimento de protótipos ou de produtos finais com recurso à impressão 3D permite obter geometrias únicas (facilitadas por este método de fabrico), complexas (sem os impedimentos tecnológicos de outrora) e num tempo relativamente reduzido.

1.3. OBJETIVOS

Com a presente dissertação, pretende-se compreender as potencialidades da impressão 3D e avaliar a sua aplicabilidade na Indústria da Construção por meio da compatibilização com o BIM. O objetivo principal passa por desenvolver uma metodologia de preparação de modelos para impressão e estudar os seus resultados em termos qualitativos (qualidade do produto e propriedades do material) e em termos quantitativos (quantidade de material utilizado, tempo de produção, custo, etc).

Apesar de a impressão 3D não se tratar de uma tecnologia recente, a sua utilização na Indústria da Construção não é comum, podendo inclusive considerar-se um tema praticamente desconhecido no setor. No âmbito desta dissertação de mestrado pretende-se desenvolver exaustivamente o conhecimento sobre esta tecnologia de fabrico. Como tal, ambiciona-se estudar os diferentes tipos de tecnologias existentes no mercado da impressão 3D e as correspondentes etapas do processo de preparação e de tratamento de impressão para as diversas aplicações possíveis.

Relativamente à metodologia BIM, por se tratar de um sistema bastante experimentado na indústria AEC pretende-se tirar partido dos desenvolvimentos alcançados nos últimos anos e adicionar ferramentas que auxiliem a introdução da impressão 3D no processo de trabalho. Por conseguinte, tenciona-se adicionar métodos de manipulação geométrica de modelos produzidos em *softwares* BIM e conciliá-los com os demais processos existentes para a impressão.

Por fim, o objetivo passa por estudar os diferentes comportamentos da impressão 3D para os diferentes tipos de modelo BIM e compreender as respetivas consequências a nível geométrico, de utilização de material, de tempo de produção e de custos associados.

1.4. ORGANIZAÇÃO

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos. À medida que se avança no documento, irão sendo estudadas as bases de conhecimento da tecnologia de impressão 3D e da modelação BIM e a correspondente compatibilização e utilização prática.

Deste modo, no capítulo 2 serão introduzidos os conceitos de impressão 3D e de BIM. A inexperiência do setor da construção na utilização da impressão 3D requer um estudo mais aprofundado sobre a mesma. Como tal, o capítulo inicia-se com a descrição de cada uma das categorias de impressão existentes, assim como das respetivas características. Analogamente, é estudado o processo *standard* utilizado na impressão, nomeadamente na sua preparação e no pós-processamento. Relativamente ao BIM, por se tratar de um tema estudado exaustivamente ao longo dos últimos anos, optou-se por apenas expor várias das utilizações com um potencial interesse na utilização da impressão 3D.

No capítulo 3, é elaborada uma proposta de trabalho de preparação de modelos BIM para a impressão 3D. Tendo em conta as diferentes etapas do processo de impressão e as dificuldades do mesmo, desenvolvem-se ferramentas de auxílio de controlo de geometrias, que permitem gerir o detalhe do modelo e adequá-lo às características da impressão. Relativamente à manipulação da geometria,

explicita-se também várias metodologias de seccionamento do modelo e de criação de estruturas de fixação do mesmo. Neste capítulo é ainda estudado o restante processo de impressão, nomeadamente, a sua preparação para a impressão propriamente dita e o pós-processamento.

O capítulo 4 aborda o caso de estudo de duas situações práticas tipologicamente diferentes e que exigem modos de processamento distintos. Para ambos os casos são demonstrados os processos de preparação dos respetivos modelos, as implicações a nível de material, de tempo de impressão e de custo que os diversos parâmetros de impressão implicam. Por fim, são avaliados os resultados finais para cada um dos casos de estudo.

No capítulo final é elaborada uma conclusão sobre a aplicabilidade dos modelos gerados em BIM na impressão 3D. É ainda feita uma reflexão acerca do futuro da impressão 3D no setor da construção, mais especificamente a partir da sua compatibilização com programas BIM.

2
ESTADO DA ARTE

2.1. IMPRESSÃO 3D

2.1.1. INTRODUÇÃO À IMPRESSÃO 3D

2.1.1.1. Conceito

"*A impressão 3D, também conhecida como fabricação aditiva, é o processo pelo qual objetos físicos são criados pela deposição de materiais em camadas, com base num modelo digital*" [1] é a definição da Autodesk para o conceito de impressão 3D. A sua metodologia baseia-se na divisão de uma figura tridimensional em secções 2D sobrepostas, do género *layer-by-layer* (camada a camada). O princípio base de uma impressora 3D é semelhante ao das impressoras tradicionais, a jato de tinta ou a laser, que formam uma imagem através da sobreposição consecutiva de camadas de tinta [2]. A *three-dimensional printing (*3DP) é assim uma alternativa à tradicional metodologia subtrativa e à moldagem por injeção, no que diz respeito a tecnologias de fabrico.

2.1.1.2. Evolução histórica

A impressão 3D surgiu durante a década de 1980. Charles Hull (1939, Colorado), então engenheiro na UPV, inc. desenvolveu em 1983 o primeiro protótipo de uma impressora 3D Stereolitography (SL), designação que viria a ser patenteada em seu nome posteriormente, em 1986 [3]. O mecanismo utilizado solidificava em camadas finas um polímero sensível à radiação UV, graças à projeção direta de um laser. No entanto ainda restam dúvidas nos dias de hoje sobre qual o verdadeiro inventor deste mecanismo. Em 1980, Hideo Kodama do Nagoya Municipal Industrial Research Institute iniciou um processo de patenteamento, mais tarde invalidado por ter expirado ainda antes da fase de análise/validação. Deste modo, a primeira patente referente à tecnologia Steoreolitography registada a nível mundial foi a de Charles Hull [4].

No ano seguinte, em 1987, seria lançado comercialmente o primeiro sistema de impressão a três dimensões SL, denominado de SLA-1, ainda em fase preliminar de testes. Este dispositivo seria o antecessor do popular SLA 250 (SLA, acrónimo para *Stereolithography Apparatus*) [4].

Nos primórdios da impressão 3D, o objeto 3D era desenhado com recurso a ferramentas básicas de CAD, dividido em formas de duas dimensões e impresso sucessivamente num único material, formando as formas desejadas. As limitações que os softwares de desenho apresentavam impediu que se atingissem níveis de detalhe muito elevados. Deste modo, numa fase inicial, Charles Hull não conseguiu criar um mercado que correspondesse às expectativas da sua inovação. Ainda assim, este seria o primeiro impulso no desenvolvimento de tecnologias de fabricação aditiva a partir de um modelo 3D digital [3].

No seguimento da evolução do 3DP, setores como a indústria automóvel, aeronáutica e médica investiram na integração desta tecnologia no desenvolvimento dos seus produtos. A sua utilização não se limitou apenas à produção de protótipos, mas estendeu-se, também, à fabricação de produtos finais prontos a serem comercializados e/ou utilizados.

Nos anos 90, a Wake Forest Institute of Regenerative Medicine (WFIRM) introduziu a tecnologia de impressão tridimensional na criação de *Scaffolds* (estruturas de suporte) aplicados em processos de regeneração de tecidos em órgãos. Mais recentemente, a aplicação desta tecnologia generalizou-se no mercado e revolucionou os processos de fabrico nas indústrias acima referidas [5].

Atualmente, as próteses médicas, por exemplo, já são impressas diretamente a partir de um modelo geométrico resultante de um scan personalizado do paciente [5]. Na indústria aeroespacial, a NASA já está a testar a incorporação na Estação Espacial Internacional de uma impressora 3D, que em caso de necessidade permite reproduzir um certo elemento, como um parafuso, com as propriedades físicas e geométricas requeridas e utiliza-lo tal como se fosse concebido pelos métodos tradicionais [6].

Esta realidade transformou o modo de como é trabalhado o produto, poupando tempo e reduzindo os custos de confeção quer na fase de prototipagem, quer na fase de produção. Assim surgiu o termo de *Rapid Prototyping* (RP), que engloba os processos tradicionais de impressão 3D e *Rapid Tooling* (RT), que se trata de uma extensão natural do RP, aplicada na validação da performance dos protótipos a usar em larga escala. Estes termos, atualmente, estão englobados sob a designação de impressão 3D [7].

2.1.1.3. Fabricação aditiva vs Fabricação subtrativa

O processo de fabricação aditiva (AM) é fundamentalmente diferente dos tradicionais processos de moldagem por injeção e de fabricação subtrativa, *Computer Numerical Control* (CNC). Os processos tradicionais de fabricação subtrativa partem de um objeto de dimensão superior ao produto final, que é trabalhado de modo a atingir uma determinada forma desejada. Por outro lado, nos processos de fabricação aditiva parte-se de formas básicas, tais como camadas, filamentos e cubos, que em conjunto originam o objeto pretendido [8]. Na Figura 1 encontra-se representado um esquema dos vários processos.

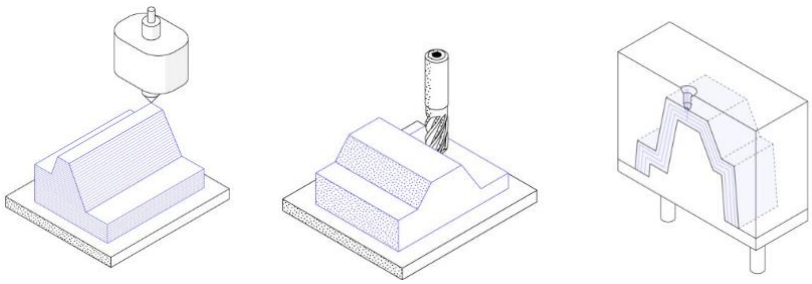


Figura 1 - Esquema (adaptado) do processo de fabrico por impressão 3D, CNC e moldagem por injeção, respetivamente [9].

Os métodos tradicionais, tais como o CNC garantem uma boa resposta no fabrico dos produtos finais, ao atingir um elevado detalhe e homogeneidade nas peças produzidas. Em contraste, nos métodos atuais de fabricação aditiva são comuns problemas de anisotropia nas peças produzidas, que variam com a orientação, com os parâmetros de fabrico e com o design da peça utilizadas [10].

A fabricação aditiva tem como grande vantagem a produção de formas complexas com possibilidade de customização sem um agravamento da complexidade do processo e das ferramentas utilizadas. Deste

modo estas características permitem uma produção de baixo volume com uma redução significativa do desperdício de material, tempo e custo. Contrariamente, a complexidade das formas de um objeto, o baixo volume de produção e uma composição heterogénea podem tornar a utilização de métodos de fabricação subtrativa proibitivos em termos de custo e tempo [8]. Na Figura 2, está esquematizada, a título meramente ilustrativo, a evolução do custo por peça em função do número de peças produzidas.

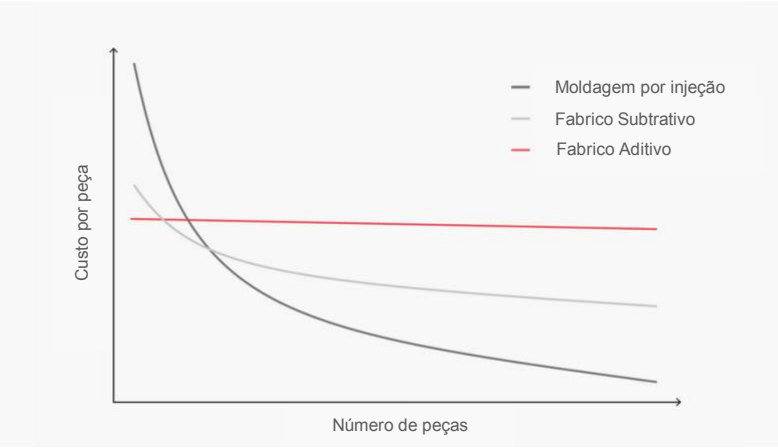


Figura 2 – Esquema (adaptado) comparativo da evolução do custo em função da quantidade de produção [11].

2.1.2. Tecnologias de impressão 3D

Tal como referido anteriormente, a grande maioria das impressoras 3D segue o princípio fundamental de reduzir uma figura de três dimensões em planos de duas dimensões, colocados sequencialmente de modo a formar um determinado volume pretendido. O processo também designado de fabricação aditiva pode ser aplicado através de um variado número de formas, seguindo sempre o mesmo princípio base.

Segundo o *ISO/ASTM 52900:2015* [12], documento que estabelece e define os termos utilizados na fabricação aditiva, as impressoras 3D podem ser categorizadas em sete tipos de tecnologias distintas, denominadas do seguinte modo: *Vat Photopolymerization, Material Extrusion, Material Jetting, Binder Jetting, Powder Bed Fusion, Direct Energy Deposition* e *Sheet Lamination*.

2.1.2.1. Fotopolimerização de Resina – *Vat Photopolymerization* (VP)

Fotopolimerização de resina ou, originalmente, *Vat Photopolymerization* é um processo de impressão tridimensional a partir de resina fotocurável ou de fotopolimeros como materiais primários no estado líquido. Estes materiais inseridos num recipiente reagem quimicamente enquanto expostos à radiação ultravioleta (UV) ou outra radiação visível compatível e solidificam com uma determinada forma resultante da incidência do laser. Esta tecnologia implica uma reação química chamada de fotopolimerização (*Photopolymerization*) e o envolvimento de vários elementos químicos que tornam o processo algo complexo. As impressoras VP têm o inconveniente de apenas poderem utilizar um material durante todo o processo de impressão [10, 13]. O esquema de funcionamento encontra-se demonstrado na Figura 3.

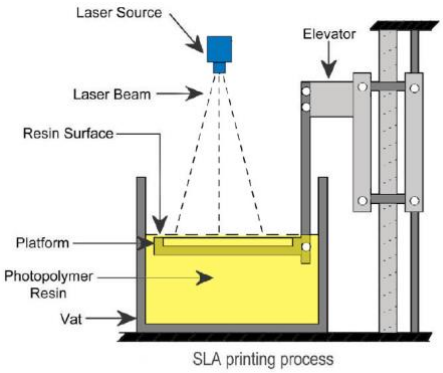


Figura 3 - Exemplo de funcionamento de impressora VP, nomeadamente do tipo SLA [14].

Existem, atualmente, várias tecnologias que aplicam o fundamento básico do fotopolimerização de resina, tais como:

- Estereolitografia ou *Stereolithougraphy* (SLA):

  As impressoras SLA usam a tecnologia original de impressão 3D. Seguindo a base de funcionamento VP, as impressoras SLA efetuam a cura do material, que poderá ser uma resina fotocurável, com recurso a um laser ultravioleta.

  De maneira geral as impressoras conseguem obter espessuras de camada entre 0,025 mm e 0,50 mm nas gamas mais altas e mais baixas respetivamente [15]. Atualmente, existem no mercado sistemas SLA com capacidade de imprimir volumes até 1500 x 750 x 550 mm [16].

- Projeção Digital de Luz ou *Digital Light Processing* (DLP):

  A tecnologia DLP é semelhante à SLA, mas utiliza a projeção de luz digital como meio de curar o material de impressão. Os materiais compatíveis com esta tecnologia são novamente do tipo de resina fotocurável.

  As marcas que produzem este tipo de impressora garantem volumes até 230 x 143,75 x 200 mm e espessura mínima entre 0,025 e 0,150 mm, dependendo do material em uso [17].

- Produção Contínua em Interface Líquida ou *Continuous Liquid Interface Production* (CLIP):

  A impressão através da tecnologia CLIP funciona à base da radiação UV tal como a SLA, no entanto, as impressoras deste tipo utilizam um método de produção da base para o topo num ambiente de oxigénio controlado. A tecnologia baseia-se na utilização de um recipiente com uma base permeável ao oxigénio, que permite assim controlar o processo de polimerização. Esta técnica resulta num processo cerca de 25 a 100 vezes mais rápido que a tecnologia SLA [18]. A gama de materiais suportados por esta tecnologia é semelhante à das SLA e DLP, embora um pouco mais limitada. Na impressão CLIP a viscosidade e a reatividade dos materiais deverá ser limitada devido ao seu princípio de funcionamento [19]. A nível de especificações das impressoras deste tipo, permite volumes até 189 x 118 x 326 mm [20].

2.1.2.2. Extrusão de material – *Material Extrusion* (ME)

Extrusão de material, também conhecido por *Material Extrusion* é um método de fabricação aditiva cujo conceito se assemelha ao processo de colocação de uma cobertura num bolo. O material de impressão armazenado é forçado a sair através de uma estrutura semelhante a uma agulha denominada de "*Nozzle*".

O material deverá, então, ser extraído a uma pressão, velocidade e diâmetro de secção constante. O filamento resultante, num estado físico semissólido, deverá fundir-se com o material colocado na camada imediatamente anterior, seguindo o princípio de 3DP [13, 21].

A impressão ME tem a capacidade de utilizar mais do que um material numa única impressão. Este facto permite modelos mais diversificados, impressos com mais do que um material ou que se processem modelos com formas geométricas mais complexas. Neste último caso, um dos materiais impressos funcionaria como material secundário de suporte, que no final teria de sofrer um tratamento de limpeza para retirar o material em excesso [13, 21]. A utilização de vários materiais pode ainda ser útil na impressão de peças coloridas (multi-cor), em que cada material corresponde a uma cor diferente.

A Figura 4 representa o princípio de funcionamento das impressoras do tipo ME.

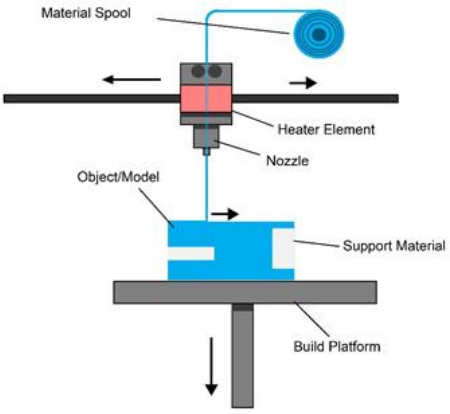


Figura 4 - Esquema de funcionamento da impressão do tipo ME [22].

Os métodos de impressão mais utilizados de ME são os seguintes:

- Modelação por extrusão e deposição de plástico ou *Fused Deposition Modeling* (FDM):

  Também designado por *Fused Filament Fabrication (FFF)*, o FDM é o método ME mais utilizado na impressão 3D. As impressoras disponíveis no mercado utilizam como material primário o polímero, tal como o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) ou o PLA (Poliácido Láctico) e podem variar de gamas e preços, de *low-cost* e simples até aos modelos mais sofisticados. É muito comum a sua utilização para produção de objetos em pequena escala [13, 21].

  Atualmente existem impressoras de gama baixa que imprimem objetos até um volume de (300 x 400 x 300 mm) com espessura de camada e material constante. Os modelos de gama mais elevada permitem utilizar vários materiais, espessuras de camada mais fina e variável (até 0,050 mm) e deste modo, obter objetos com mais detalhe, com várias cores e formas mais complexas [21, 23].

  Para a impressão a cores, já é possível imprimir modelos com um número variado de cores nos aparelhos de gama mais baixa, mediante a utilização de um acessório de mistura de filamentos [24].

  As impressoras FDM estão pensadas para requerer o mínimo de configuração e de intervenção, resultando num processo de fabrico bastante direto e autónomo. Este tipo de impressoras é ideal para usos de escritórios e domésticos, uma vez que podem funcionar em vários ambientes, sem produção de gases ou de outros elementos prejudiciais [21].

- Contour Crafting (CC):

  Este método assemelha-se bastante ao FDM mas aplicado a objetos de grande dimensão. Pensado para a produção de elementos com vários metros, a impressora do tipo CC deposita camadas de material com uma espessura elevada. Através de uma segunda estrutura de forma configurável, a impressora alisa as superfícies de modo a obter a forma desejada. Os objetos impressos poderão ser constituídos por materiais, tais como betão ou cerâmico. Este facto, faz da CC uma opção viável para utilização direta em obra [21, 25].

2.1.2.3. Jato de Material – *Material Jetting* (MJ)

A impressão do tipo MJ segue a mesma técnica de impressão das impressoras tradicionais de jato de tinta. Gotículas de material de impressão (que pode variar) são depositadas sobre a plataforma de impressão e posteriormente solidificadas. As gotas ao entrarem em contacto com a camada impressa anteriormente transformam-na num estado amolecido. O material solidifica de imediato e todo o processo repete-se novamente, camada a camada. Conforme a tecnologia utilizada, o procedimento poderá recorrer a processos de radiação UV, tal como na impressão VP, ou poderá recorrer a outros tratamentos, por exemplo, à base de calor [13, 26].

As impressoras desta categoria, poderão ter várias cabeças de impressão, que poderão imprimir em materiais diferentes, com características físicas diferentes, de acordo com a necessidade (Figura 5) [19]. Poderão, inclusive, ser impressos materiais secundários de suporte que permitirão a conceção de formas mais complexas. No final do processo de impressão, os elementos do material de suporte são retirados manualmente, dissolvidos em água ou retirados por aumento da temperatura [27].

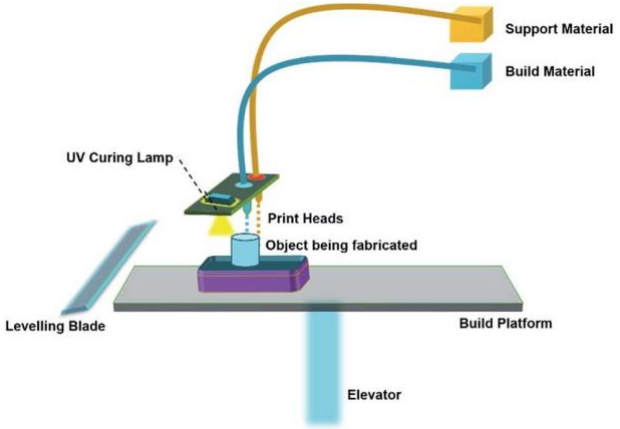


Figura 5 - Esquema de funcionamento MJ [28].

Atualmente, existem no mercado vários tipos de impressoras MJ que se colocam em várias subcategorias, tais como:

- *Material Jetting* (MJ):

  Fabricadas pela *3D Systems* e pela *Stratasys*, as impressoras MJ produzem objetos a partir de materiais fotopolimeros acrílicos [26]. Consoante o material escolhido, as suas especificações poderão permitir propriedades e aplicações diferentes. Alguns exemplos de materiais são o *VeroWhitePlus,* rígido, de alta durabilidade e precisão e o *Digital ABS*, com uma elevada temperatura de deformação ao calor, entre outros [13].

As impressoras MJ podem atingir preços muito elevados no contexto das impressora 3D. Nas gamas mais altas os objetos poderão atingir volumes de 1000 x 800 x 500 mm, camadas com espessuras de apenas 0,016 mm e resoluções de impressão por camada até 600 dpi em ambas as direções (X, Y) [29].

- *NanoParticle Jetting* (NPJ):

  A impressão NPJ, traduzido para Jato de Nano Partículas, permite a aplicação da tecnologia *Material Jetting* a materiais metálicos e cerâmicos, tais como o aço inoxidável 316L e Zirconia 3YSZ, respetivamente. Segundo os dados fornecidos pela XJET, fabricante de impressoras NPJ, é possível produzir objetos recorrendo à cura à base de calor [30]. Como resultado registam-se espessuras de camada entre 0,005 mm e 0,010 mm nas impressoras de metal e entre 0,010 e 0,015 mm nas impressoras cerâmicas [31, 32]. Este facto faz com que esta tecnologia permita a impressão de objetos muito detalhados e com uma elevada rigidez pela natureza das propriedades físicas do próprio material.

- Processo DoD - *Drop On Demand* (DOD):

  Tecnologia original da marca *Soldiscape*, estas impressoras utilizam polímero ou cera derretida como material primário. Através de uma resistência o material no reservatório é aquecido até ser forçado a sair pela cabeça de impressão [26].

  Categorizada numa gama de baixo custo dentro das impressoras MJ, as impressoras DOD garantem volumes de impressão até 152 x152 x 102 mm, camadas de espessura mínima de 0,00635 mm e uma resolução até 5000 x 5000 dpi nos planos de impressão [33].

  O resultado final é uma impressão lenta, mas com capacidade de produzir objetos detalhados. Esta tecnologia é recorrentemente utilizada na produção de moldes para a indústria da joalharia e da medicina dentária [26].

2.1.2.4. Jato de Aglutinante - *Binder Jetting* (BJ)

Desenvolvida no Massachusetts Institute of Technology (MIT) e chamada originalmente de *Three-Dimensional Printing*, a tecnologia BJ utiliza dois materiais durante o processo de impressão (Figura 6). O primeiro é um material em pó (Powder) de grão muito fino e de diâmetro específico, e o segundo pode ser considerado de modo simplificado uma cola (Binder). O processo inicia-se com a deposição dos grãos de aglomerado numa fina camada, convenientemente sobrepostos de modo coeso. De seguida, a estrutura denominada de Binder, distribui pequenas gotas de cola com diâmetro de cerca de 80 μm sobre os grãos de aglomerado. A área abrangida corresponde à secção da camada da figura a imprimir. Quando a impressora termina a impressão de uma camada, a plataforma (Powder Bed) onde está colocado a material em pó é rebaixada. Seguidamente, o processo prossegue para a camada seguinte e deste modo a figura a imprimir vai solidificando numa peça apenas. Depois de concluída a fase de impressão, o objeto permanece no interior da impressora até que a cola fique rígida. Por fim, o objeto passa um tratamento de acabamento onde são removidos todos os excessos com recurso à aplicação de ar comprimido. Dependendo do material utilizado, poderá ser necessário submete-lo a um tratamento de impermeabilização [34].

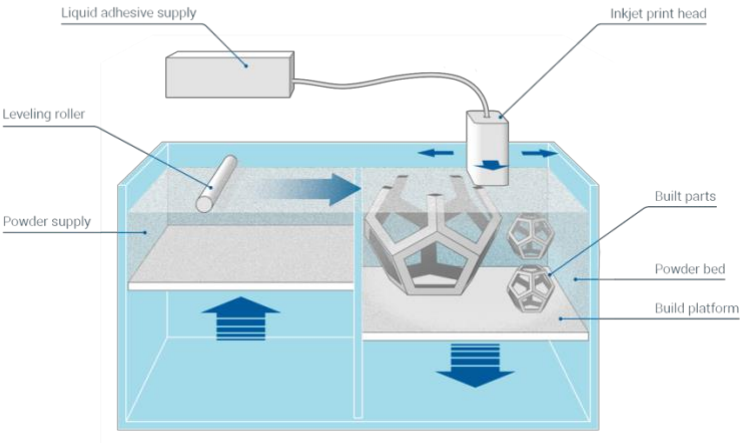


Figura 6 - Esquema de funcionamento das impressoras BJ [35].

O material utilizado pelas impressoras BJ varia com a gama do aparelho. Nas gamas mais baixas é utilizado gesso ou polímero em pó como material principal juntamente com uma cola à base de água. Exemplos de materiais utilizados incluem o material em pó comercializado em Sulfato de Cálcio Hemi-hidratado e PMMA (Acrílico). Os objetos impressos nestes materiais poderão ter um bom desempenho a nível visual, no entanto, devido à sua fragilidade, deverão ser usados meramente para a função de visualização. Nas gamas mais elevadas poderão ser usados materiais mais resistentes como o aço inoxidável, *Inconel Alloy* e materiais cerâmicos. São comercializadas, atualmente, impressoras que imprimem com metais e outras com areia, estas últimas ideais para a produção de moldes [13, 34].

O nível de performance das impressoras BJ pode variar com o tipo de material e de gama da impressora. As gamas mais baixas garantem volumes até cerca de 236 x 185 x 127 mm, resoluções de imagem até 300 x 450 dpi e espessuras mínimas de 0,1 mm. Por outro lado, as gamas mais altas, conseguem atingir volumes de 4000 x 2000 x 1000 mm, resoluções de 600 x 600 dpi e espessuras entre 0,12 e 0,3 mm [34].

Uma vantagem deste método trata-se de permitir a criação de um objeto de forma geometricamente complexa sem necessitar de uma estrutura de suporte, uma vez que o próprio material em pó que não faz parte da secção de impressão tem a capacidade de suportar o objeto. Algumas das impressoras BJ, apesar de apenas utilizarem um material de impressão, têm a capacidade de imprimir peças *full-color*. Este termo aplica-se às impressões cuja superfície do objeto pode apresentar diferentes cores num só material, criando objetos mais atrativos do ponto de vista visual. De modo geral as impressoras BJ têm uma grande capacidade de imprimir grandes volumes a alta velocidade (até 35 mm/h de deposição de material) e a um custo relativamente baixo [13, 34].

2.1.2.5. Fusão de Cama de Pó - *Powder Bed Fusion* (PBF)

A impressão PBF (Figura 7) funciona de forma similar à impressão BJ. Um recipiente cheio com material em pó é aquecido até à temperatura imediatamente inferior à temperatura de fusão. De seguida, uma estrutura denominada de "*Blade*" ou "*Roller*" coloca uma fina camada de material (geralmente, cerca de 0,10 mm para metais e entre 0,05 mm e 0,15 mm para os polímeros) sobre a plataforma de impressão. Neste momento, uma outra estrutura de fonte de calor, que poderá ser um laser ou outra, funde a fina pelicula de material com o restante já impresso. No final do procedimento em cada camada, a estrutura de impressão (*Powder Bed*) desce e repete todo o processo novamente para a camada

seguinte. Quando a impressora finaliza a impressão do objeto, este permanece no seu interior a arrefecer. Posteriormente, é submetido a um tratamento de limpeza e se necessário de polimento [8, 13, 36].

As impressoras PBF foram, originalmente, criadas para a produção de objetos de plástico com fusão a laser. Mais tarde, conseguiu-se alargar o número de materiais suportados por este procedimento com a impressão de metal e de materiais cerâmicos. Com o surgimento de novas fontes de calor este número voltou a aumentar e já é possível imprimir numa vasta gama de materiais, metálicos, cerâmicos, polímeros e compósitos [36].

É importante referir que as impressoras PBF podem ser sub-categorizadas conforme o tipo de material e o tipo de fonte de calor utilizado. Em relação à fonte de calor, existem vários tipos de tecnologias de fundição utilizadas. As mais comuns recorrem a um laser, sendo denominadas de LS (*Laser Sintering*), que no caso de imprimirem polímeros ou metal adotam terminologias diferentes, pLS e mLS, respetivamente. A generalidade das impressoras de funcionamento sem utilização de laser são por fusão com feixe de eletrões. Apesar do funcionamento base ser o mesmo, devido às diferentes técnicas utilizadas e/ou materiais utilizados, a constituição de cada impressora varia com os diferentes tipos [36].

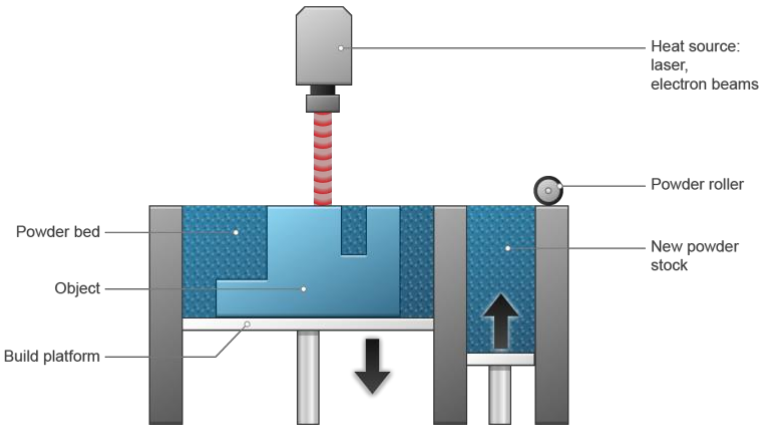


Figura 7 - Esquema de funcionamento das impressoras PBF [37].

Deste modo, de todos os tipos de impressoras PBF, destacam-se as seguintes:

- Sinterização Seletiva por Laser ou *Selective Laser Sintering* (SLS)

  A tecnologia SLS segue o funcionamento do tipo pLS referido anteriormente. A impressora com recurso à utilização de um laser funde o material, seguindo o princípio de funcionamento PBF descrito. Neste tipo de impressão poderão ser utilizados vários tipos de polímeros, dos quais se destaca o Nylon. Também poderão ser usados de modo indireto metais e materiais cerâmicos mediante a utilização de polímeros que permitam a sua união [36].

  Os volumes de impressão para este tipo de tecnologia poderão alcançar valores de 700 x 380 x 380 mm e uma espessura mínima de 0,012 mm, para modelos de gama alta.

- Deposição por Energia Direcionada (*Direct Metal Laser Sintering* - DMLS) e Fusão Seletiva por Laser (*Selective Laser Melting* - SLM)

  As impressoras DMLS e SLM podem ser aglomeradas no grupo de impressoras mLS anteriormente definido. Este tipo de impressoras utiliza a tecnologia PBF e o laser como fonte de calor para fundir o material, que poderá ser metálico ou cerâmico. Dentro dos materiais

metálicos, atualmente, é possível imprimir objetos de Titânio, de Aço Inoxidável, de Alumínio, de Cromo-Cobalto e metais à base de Níquel [13, 36].

Segundo as especificações técnicas das empresas produtores deste tipo de dispositivos, nas impressoras de gama mais elevada, o volume máximo de impressão ronda os 500 x 280 x 850 mm e uma espessura entre 0,020 e 0,090 mm [38].

- Fusão por Feixe de Electrões ou *Electron Beam Melting* (EBM)

  Como o próprio nome indica, ao contrário de utilizar um laser, como no caso dos sistemas SLS e DMLS/SLM, o EBM utiliza um feixe de eletrões para fundir o material. Este método aplica-se a metais como o titânio e o cromo-cobalto. Comparativamente às tecnologias a laser, o EBM implica espessuras maiores, resoluções menores e diâmetro mínimo da partícula de material maior, no entanto, garante velocidades maiores, menor necessidade de utilização de suportes e custos de produção menores [39].

  Em relação às especificações das impressoras EBM, estas imprimem volumes na gama dos valores de 200 x 200 x 380 mm e espessura mínima de 0,100 mm [40].

2.1.2.6. Deposição por Energia Direcionada - *Direct Energy Depositon* (DED)

A impressão do tipo DED, de modo simplificado, refere-se a um processo de soldadura de metal em três dimensões (Figura 8). Ao contrário do funcionamento do PBF em que o material colocado na plataforma de impressão era aquecido, neste caso o material depositado é fundido à medida que é aplicado. Aproveitado predominantemente na produção de modelos em metal, a DED também pode ser utilizada na produção de modelos cerâmicos e polímeros [41].

O processo de impressão aplicado na tecnologia DED começa pela aplicação de calor sobre o material a depositar com recurso a um laser ou a um feixe de eletrões. Através de movimentos em três eixos, o material é devidamente depositado camada a camada, num método algo semelhante ao ME. Por fim, o material solidifica e o objeto é criado.

Tipicamente, os objetos produzidos por meio da tecnologia DED apresentam limitações relativas à qualidade do acabamento superficial e de detalhe devido ao próprio processo de fabricação [8].

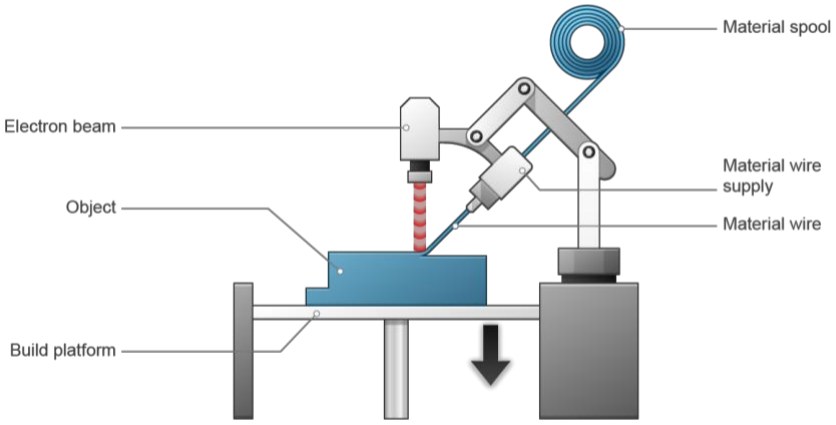


Figura 8 - Esquema de funcionamento das impressoras do tipo DED [42].

Há várias empresas que apostam na produção de impressoras DED, o que resultam num número elevado de variações, das quais se destacam as seguintes:

- Fabricação de Forma Final a Laser ou *Laser Engineering Net Shape* (LENS)

  A impressão LENS utiliza laser para fundir o material impresso. A tecnologia LENS tem a capacidade de produzir objetos a partir de vários tipos de metal. A Optomec, produtora de impressoras LENS, garante no modelo de gama mais elevada, LENS 850-R, volumes de impressão até 900 x 1500 x 900 mm e uma resolução linear de ± 0,025 mm. As impressoras LENS conseguem velocidades de 60 mm/s, que em alguns casos poderão ser até 20 vezes mais rápidas que as impressoras PBF na impressão do mesmo objeto [43, 44].

- Fabricação Aditiva por Feixe de Electrões ou *Electron Beam Additive Manufacturing* (EBAM)

  A impressão com recurso a fundição por feixe de eletrões consegue obter resultados de eficiência energética elevados quando comparados com a impressão LENS [41]. A tecnologia EBAM aplica-se a vários tipos de metais, tais como o Titânio, o Alumínio (2319 e 4043), o Inconel (718 e 625), Níquel, Tungsténio, entre outros. Em relação às especificações técnicas da impressão EBAM, esta garante volumes a partir de 203 mm^3 até 5790 x 1220 x 1220 mm [45]

2.1.2.7. Construção por Laminados - *Sheet Lamination* (SL)

O princípio da SL combina processos aditivos e subtrativos na produção de objetos tridimensionais [8]. Para tal, baseia-se na colocação de folhas de material cortadas convenientemente e posteriormente unidas, camada a camada (Figura 9). O processo repetitivo inicia-se pela colocação de uma folha (*Sheet*). De seguida, utilizando um laser ou outro dispositivo, a folha é cortada com a forma da secção correspondente do objeto. Por fim, a folha é colada à folha da camada imediatamente anterior. O processo, à semelhança de todos os restantes tipos de tecnologia, repete-se até que todas as camadas tenham sido processadas [8, 46].

A SL poderá ter pequenas variações consoante o seu processo de corte, tipo de material utilizado e estratégia de união das folhas. Em relação ao último, poderá desenvolver-se com recurso a cola, por fusão térmica, fixação ou por soldadura ultrassónica [46].

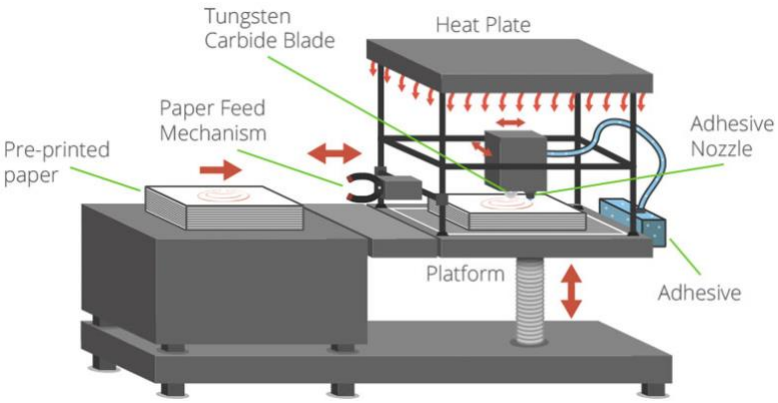


Figura 9 - Esquema de funcionamento das impressoras do tipo SL [47].

O tipo de impressão SL original, denominado por Manufatura de Objetos Laminados (*Laminated Object Manufacturing* – LOM), utiliza um laser CO_2 para cortar as folhas à base de papel "Butcher" que posteriormente são unidas com um processo de colagem camada a camada. Neste tipo de impressão, a espessura de cada folha está compreendida entre 0,07 e 0,20 mm [46].

Algumas das impressoras SL incluem a capacidade de incluir no processo de impressão 3D um mecanismo de impressão 2D que confere a possibilidade de imprimir a cores do tipo *full-color* [46].

2.1.2.8. Comparação das tecnologias

A existência de número vasto de tecnologias e de aparelhos disponíveis no mercado dificulta a escolha do dispositivo mais adequado para uma dada utilização. A grande diversidade de materiais, o custo, o detalhe e até mesmo o tempo de impressão poderão ser fatores determinantes para a sua escolha. Dos sete grupos de tecnologias abordados até este momento destacam-se as seguintes vantagens e desvantagens listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens de cada tecnologia de impressão 3D [48, 49].

Tipo de impressora	Vantagens	Desvantagens
VP	1. Elevado detalhe de impressão; 2. Impressões com superfície suave; 3. Elevada velocidade de impressão.	1. Requer suporte de impressão; 2. Requer Pós-processamento para retirar apoios e tratar as superfícies; 3. Requer cura para melhorar resistência mecânica; 4. Impressão de elevado custo.
ME	1. Impressão de baixo custo; 2. Grande gama de materiais disponíveis; 3. Versátil e de uso simples; 4. Impressão com vários materiais.	1. Reduzida velocidade de impressão; 2. Impressões com superfície de detalhe reduzido e/ou marcas de impressão; 3. Modelos anisotrópicos.
MJ	1. Reduzido desperdício de material; 2. Elevado detalhe de impressão; 3. Impressão com vários materiais e cores, *full-color*; 4. Propriedades mecânicas e térmicas homogéneas ao longo da peça.	1. Pós-processamento necessário, que pode danificar detalhes mais pequenos do modelo; 2. Suporte de impressão não reutilizável; 3. Propriedades mecânicas de baixo qualidade; 4. Impressão de custo muito elevado.
BJ	1. Capacidade de impressão *full-color;* 2. Capacidade de criar moldes para moldagem de metais; 3. Suporte de impressão automaticamente adicionado; 4. Eficiente energeticamente; 5. Volume de impressão de elevadas dimensões.	1. Superfície granulada e pouco suave; 2. Pouca resistência mecânica; 3. Pós-processamento necessário.
PBF	1. Suporte de impressão desnecessário; 2. Material pode ser reciclado;	1. Superfície com detalhe reduzido na impressão de polímeros;

Tipo de impressora	Vantagens	Desvantagens
	3. Grande gama de materiais disponíveis; 4. Elevado detalhe de impressão a metal.	2. Reduzida velocidade de impressão; 3. Impressão de volumes pequenos e médios apenas; 4. Impressoras com preço elevado.
DED	1. Elevada velocidade de impressão; 2. Volumes de impressão elevados.	1. Impressão de modelos de complexidade baixa ou média apenas; 2. Reduzido detalhe de impressão; 3. Reduzida gama de materiais disponíveis.
SL	1. Elevada velocidade de impressão; 2. Material de impressão de baixo custo; 3. Sem necessidade de adição de suportes de impressão; 4. Capacidade de impressão com vários materiais e cores, *full-color*.	1. Elevado desperdício de material; 2. Dificuldade de extração de suporte em cavidades internas; 3. Produção de gases tóxicos no processo de impressão; 4. Possibilidade de empenamento da peça durante a impressão.

Com o intuito de demonstrar as características relativas às propriedades de impressão de cada um dos sete tipos de tecnologia abordados, tal como o volume de produção, a espessura de camada mínima, a possibilidade de imprimir a cores e a gama de materiais, elaborou-se a Tabela 2. Nela estão demonstrados os parâmetros suprarreferidos para um modelo meramente ilustrativo de cada uma das tecnologias. Com esta tabela não se pretende afirmar um intervalo restrito de valores, mas apenas dar a perceber a gama de valores que um utilizador poderá encontrar no mercado de modelos de entrada, ou seja, de gama baixa.

Tabela 2 – Quadro ilustrativo das características de uma impressora de gama baixa para cada tipo de tecnologia.

Categoria	Sub-Categoria	Material	Impressão a Cores	Preço base	Espessura de camada mínima (μm)	Volume de produção (mm)			Fabricante/ Modelo
VP	SLA	Resina	Não	1295,00 (USD)	5 25[1]	130	130	180	Peopoly Moai [50]

[1] Valores referentes à capacidade mecânica da impressora e à espessura mínima, respetivamente. A espessura da camada fica limitada pela resina utilizada.

Categoria	Sub-Categoria	Material	Impressão a Cores	Preço base	Espessura de camada mínima (μm)	Volume de produção (mm)			Fabricante/ Modelo
ME	FDM	PLA ABS	Multi-cor	769 (EUR)	50	250	210	210	Prusa I3 MK3S [23]
MJ	DOD	Cera	Não	39650 (USD)	6,35	152	152	101	Solidscape S350 [33]
BJ	BJ	Polímeros Cerâmicos	Não	50000 a 100000 (USD)[2]	40 a 500	380	380	300	CONCR3DE Armadillo White [51]
PBF	SLS	TPU PA TPE	Não	11990 (EUR)	75 a 175	110	150	250	SINTERIT LISA PRO [52]
DED	LENS	Metal	Não	450000 (USD)[2]	-	150	150	150	Optomec CS 150 AM CA [53]
SL	SL	Papel	*Full-color*	15866,00 (USD)	100	256	169	150	Mcor Iris [54]

2.1.3. COMPRAR OU SUBCONTRATAR?

O desenvolvimento das impressoras 3D e a crescente utilização de modelos impressos fez aumentar a procura por esta tecnologia, no entanto, dependendo da sua utilização e do custo, a opção mais viável poderá não ser adquirir uma impressora 3D, mas recorrer a serviços de impressão, semelhantes às papelarias tradicionais.

No presente existem várias empresas que se dedicam à impressão de modelos 3D digitais a partir da internet. Algumas empresas permitem o carregamento de um modelo remotamente, posteriormente impresso nas instalações da empresa e enviado para local destinado [55, 56]. Outras empresas estabelecem a ligação entre quem pretende imprimir um objeto e o proprietário de uma impressora 3D com as características pretendidas, que se encontre numa localização próxima [57]. Deste modo, o utilizador que optar por um serviço online de impressão, poderá escolher o serviço com base no tipo de impressão, precisão, velocidade, material, preço e localização do serviço pretendidos, entre outros [57].

A escolha por adquirir uma impressora 3D ou utilizar um serviço de impressão deverá basear-se em múltiplos aspetos, tais como o tipo de utilização, a regularidade da utilização, prazos e necessidade de formação. As empresas que fornecem ambos os serviços afirmam que se torna mais viável recorrer a serviços online quando se pretende obter um número elevado de objetos, quando se pretende utilizar tecnologias, materiais, detalhes e volumes fora do alcance das impressoras mais acessíveis. Quanto mais

[2] Preços fornecidos apenas sob consulta. Poderão variar ao longo do tempo e mediante o tipo de encomenda.

complexo for o sistema adquirido, mais formação técnica irá requerer para se consiga obter os resultados esperados [58]. Na tabela seguinte (Tabela 3) é possível verificar as principais vantagens e desvantagens de cada opção com base nas recomendações de cada serviço.

Tabela 3 – Vantagens e desvantagens de comprar e de subcontratar [59].

	Vantagens	Desvantagens
Comprar	1. Custo por peça mais baixo; 2. Produção em baixa quantidade mais rápida; 3. Controlo total no design da peça; 4. Impressoras de gama baixa relativamente acessíveis.	1. Limitações de qualidade (detalhe e material) nas impressoras de gama baixa; 2. Incapacidade de impressão de grandes volumes nas impressoras de gama baixa; 3. Requer formação técnica.
Subcontratar	1. Acesso a múltiplas tecnologias; 2. Acesso a múltiplos materiais; 3. Aconselhamento técnico da impressão; 4. Sem compromisso a longo prazo; 5. Sem investimento inicial;	1. Custo por peça superior; 2. Prazo de entrega superior; 3. Pequenas alterações são mais caras; 4. Limitações técnicas na criação de modelos.

2.1.4. Processo

2.1.4.1. Processo de trabalho

O processo de fabricação aditiva obriga à execução de várias tarefas desde a ideia inicial até ao produto final. Apesar das semelhanças evidenciadas com a impressão 2D, a 3DP exige uma preparação e um tratamento mais cuidadoso [60].

A Figura 10, descreve o procedimento a partir do momento em que dispõe do modelo tridimensional, a respetiva preparação para a impressão e a impressão propriamente dita.

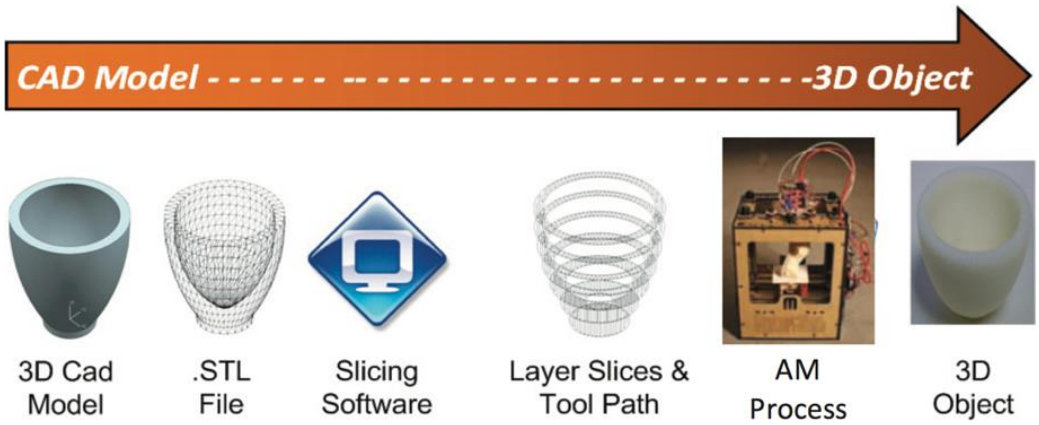


Figura 10 - Esquema do percurso do processo de impressão [61].

O *workflow* da impressão 3D tem por base um modelo digital 3D que é transformado num modelo STL, dividido em camadas e impresso. A execução de cada uma destas tarefas não é simples e requer uma preparação prévia e um tratamento no final. Deste modo, podem ser consideradas duas grandes fases ao longo de todo o processo, o **Pré-processamento** referente às tarefas a executar antes do momento de impressão e o **Pós-processamento,** que diz respeito a possíveis tarefas a executar após a impressão do objeto [60].

2.1.4.1.1. Pré-Processamento

Na primeira fase, deverá ser definido o modelo digital e os parâmetros relacionados com a impressão, nomeadamente, a orientação da peça, a adição de suportes de impressão em caso de necessidade, a transformação do modelo 3D em planos 2D (*slicing*) e por fim, o planeamento do percurso de impressão [62].

Ao contrário dos métodos de fabricação subtrativa, a fabricação aditiva permite elaborar objetos mais complexos cuja produção numa peça apenas só é possível com recurso a impressão 3D. Deste modo, a modelação do objeto deverá tirar partido dessas mesmas capacidades. Dependendo da tecnologia de impressão utilizada, o modelo poderá ter de sofrer algumas alterações para corresponder às características da impressora [63] .

O processo AM tem início com a modelação 3D do objeto, havendo para tal várias soluções disponíveis no mercado, das quais se destacam o SketchUp, o SolidWorks, o AutoCAD, o Rhinoceros, o Formit e o Fusion360. Contemplando a integração de processos BIM a 3DP, interessa que os *softwares* de modelação sejam orientados para a modelação de edifícios de acordo com a metodologia BIM, enquadrando-se neste domínio de aplicações como o Revit, o ArchiCAD, o Tekla, *etc*. Apesar do processo de impressão tipicamente progredir numa direção apenas, poderá ser também iterativo. Neste caso o modelo poderá sofrer alterações de acordo com o *feedback* de etapas seguintes [8].

De seguida, deverá efetuar-se a conversão do ficheiro CAD original para um formato do tipo compatível com a impressora em uso, de modo geral, recorrendo ao formato "STL" [8]. Acrónimo para STereoLithography [64], o STL transforma os modelos CAD formados por geometrias irregulares em formas aproximadas e constituídas por triângulos definidos pelo seu vetor normal e pelos seus três vértices [60, 64]. De modo simplificado, este tipo de ficheiro forma uma figura aproximada da original, constituída apenas de retas e pontos de interseção, tal como na Figura 11. Toda a informação relacionada com a cor ou material associado no modelo original é ignorada durante a conversão [64]. Atualmente, grande parte dos programas de modelação já incluem a possibilidade de guardar o modelo diretamente no formato STL.

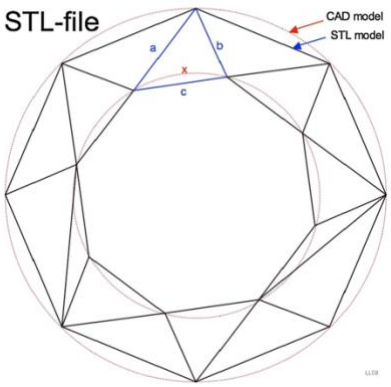


Figura 11– Exemplo de conversão para STL [65]

Finalizado o processo de conversão do formato para STL, o modelo deverá ser preparado para a impressão. Existem diversos softwares disponíveis no mercado que auxiliam na preparação da impressão. Exemplos deste tipo de programas são o *Cura*, principalmente integrado com as impressoras FDM e SLA, e o *Simplify3D*, ambos disponíveis para *Windows* e *Mac*. Nesta fase são definidas as espessuras de cada camada, a percentagem e a geometria do preenchimento interior, a orientação do objeto e por fim é dada a divisão do modelo em camadas.

Uma vez que a impressão 3D se trata de um processo aditivo, os objetos não terão obrigatoriamente de ser totalmente maciços. A otimização do preenchimento interior com recurso a estruturas celulares, topológicas, entre outras, poderão garantir as formas desejadas, poupando material e diminuindo o tempo de impressão [60]. Na Figura 12 estão exemplificadas várias percentagens de preenchimento interior.

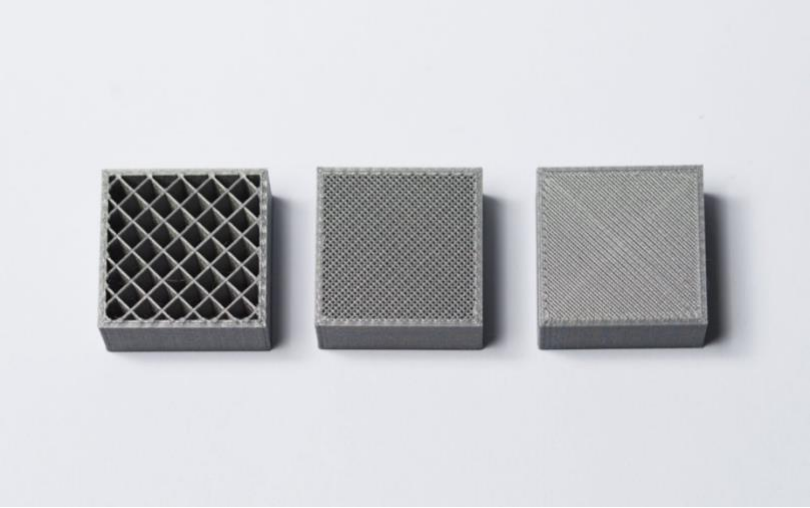


Figura 12 - Exemplo de estrutura na formato retangular, impressa com diferentes percentagens de preenchimento interior (20%, 50% e 75%, respetivamente) [66].

A escolha da orientação para a impressão é um dos passos mais importantes de todo o processo. Este passo pode dar-se ainda no modelo 3D original ou no modelo convertido STL. A existência de um número infinito de orientações possíveis pode dificultar a sua escolha. A orientação definida deverá ter em conta aspetos como a quantidade de material de suporte necessário, tempo e precisão da impressão, entre outras [67]. A escolha de uma má orientação poderá resultar em excesso de material de suporte e consequentemente num acabamento superficial de má qualidade devido às marcas deixadas pelo suporte (Figura 13) [67].

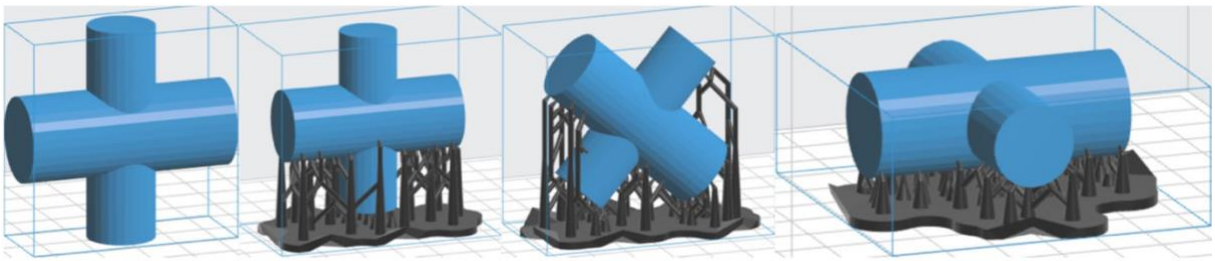


Figura 13 – Exemplo de colocação de estrutura de suporte para diferentes orientações de impressão [60].

No que diz respeito ao dimensionamento de estruturas de suporte para a impressão, a escolha deve ser criteriosa de modo a escolher o mínimo material possível que garanta o suporte necessário [60]. Tal

como referido anteriormente na abordagem às tecnologias de impressão, nem todas as impressoras requerem uma estrutura de suporte [60].

De seguida o modelo deverá ser "fatiado" em camadas, com uma espessura de acordo com as capacidades de cada impressora, que poderá ser variável ou uniforme. Por norma, as camadas são de espessura constante. Este facto faz com que, por vezes, seja apelidada de impressão 2.5D, uma vez que tende a perder definição na direção do eixo vertical [60]. O processo denominado de *"slicing"* poderá ocorrer antes ou depois da conversão para o ficheiro STL. Caso seja antes, poderão evitar-se alguns erros provocados pelas alterações geométricas do formato STL [60].

Por fim, o percurso de impressão é definido após a figura, no formado STL, se encontrar devidamente dividida em camadas. Neste passo são definidos todos os movimentos e processos que a impressora irá tomar durante a impressão [67]. Contudo, estes não serão iguais para todas as impressoras 3D, uma vez que os mecanismos de impressão são diferentes. Esta informação deverá ser então guardada num formato capaz de transmitir à impressora o percurso de impressão. Um formato usado recorrentemente é o G-code, que se trata de um formato com uma linguagem de programação antiga, criado originalmente nos anos 1950 para o controlo de maquinaria industrial [68].

2.1.4.1.2. Pós-Processamento

Nem todas as peças impressas terão de sofrer um tratamento após a impressão, no entanto, a maior parte das impressoras irá requerer um tratamento de acabamento. Devido ao princípio base da impressão 3D, os objetos tendem a ter um efeito semelhante ao das escadas de uma habitação [60]. Deste modo, as superfícies curvas e inclinadas tendem a apresentar uma superfície menos suave do que teriam se resultassem de processos de fabricação subtrativa ou de moldagem de injeção [60]. Há vários métodos utilizados para contornar o problema tais como a utilização de acetona, a passagem de areia ou até mesmo derretendo a superfície. Estes métodos têm o inconveniente de serem desgastantes para o material e da sua execução poder consumir bastante tempo [69].

Outro passo importante é o da separação dos elementos de suporte do objeto pretendido (Figura 14). Esta fase é de máxima importância, uma vez que se mal-executado poderá danificar o objeto. É natural que mesmo retirando o suporte de modo eficaz, este deixe marcas na superfície da peça [62]. A utilização de um dos métodos referidos acima poderá diminuir este efeito.

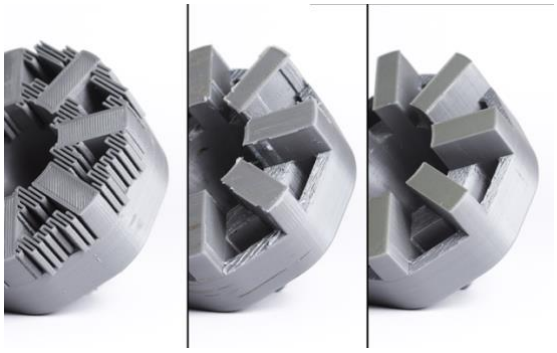


Figura 14 – Pós-processamento de uma impressão FDM [70].

2.1.4.2. Aplicações utilizadas

2.1.4.2.1. Modelação

O primeiro passo da criação de um objeto é imaginá-lo e concebe-lo através de descrições elementares, rascunhos e representações básicas. Em termos da cadeia de processo para a impressão 3D de um objeto, o primeiro passo formal passa pela modelação do protótipo digital num *software Computer-Aided Design (*CAD), através da definição geométrica do objeto, das características materiais e restantes propriedades. Atualmente encontram-se disponíveis vários programas de modelação CAD/BIM com diferentes princípios, capacidades, acessibilidade e preço [8]. Dos programas de modelação a três dimensões destacam-se o Solidworks e o SketchUp. No âmbito desta dissertação, os programas de modelação mais adequados deverão ser aplicações BIM, tais como o Revit e o ArchiCAD, entre outros.

- **Revit:**

  Programa de modelação desenvolvido pela Autodesk. Este software permite a criação de modelos tridimensionais de edifícios com informação associada [71]. O seu funcionamento baseia-se na modelação paramétrica de objetos e utiliza como base ferramentas de modelação de paredes, pilares, pavimentos, tetos, janelas, portas, tubos, equipamentos e os restantes elementos característicos dos edifícios e respetivas instalações.

- **ArchiCAD:**

  Programa de modelação BIM desenvolvido pela Graphisoft bastante orientado para a modelação da arquitetura [72]. À semelhança do Revit, trata-se de um software desenvolvido com base em princípios de modelação paramétrica de objetos, orientada para a indústria da construção.

- **Solidworks:**

  Programa de modelação livre de formas tridimensionais desenvolvido pela Dassault Systèmes S.A.. Embora não se trate de uma aplicação BIM, o Solidworks baseia igualmente o seu funcionamento em modelação paramétrica, sendo possível criar formas tridimensionais a partir de operações geométricas elementares controladas por parâmetros e relações entre elementos. O processo de criação de um objeto geralmente inicia-se pela criação de um formato a duas dimensões, denominado "2D *sketch"* com base na definição de pontos, retas, arcos e superfícies. De seguida são definidas as dimensões paramétricas, alteráveis a qualquer momento, pelo que as dimensões definidas comandam a geometria do objeto e não o contrário. Através de operações geométricas, o desenho a duas dimensões pode ser transformado e editado num modelo a três dimensões por meio da criação de superfícies e sólidos.

- **Sketchup:**

  Programa de modelação 3D produzido pela própria Sketchup, que atualmente pertence à Trimble. Utilizado em atividades como a arquitetura, engenharia civil, engenharia mecânica, indústria dos videojogos, a sua modelação destaca-se por se basear a partir do patenteado "*Push and Pull"* com o qual é possível obter formas 3D a partir da extrusão de superfícies planas.

Relativamente aos softwares BIM suprarreferidos, a criação de geometrias parametrizadas mais sofisticadas pode ser realizada através de ferramentas de programação visual. Este tipo de programação destina-se à manipulação de geometria e de informação de modelos BIM de modo menos restritivo. O seu funcionamento baseia-se na criação de um código através de uma interface mais amigável e visual, a partir da união de nós (originalmente designado por *node*) que representam vários tipos de funcionalidades e operações [73]. Assim, os programas como o Revit e o Rhino apresentam a

possibilidade de serem manipulados através de códigos visuais e não, somente, através de código no formato tradicional de texto [73].

- **Dynamo:**

  O Dynamo é um *software* gratuito de programação visual baseado na linguagem de programação Python, que possibilita a interação com o Revit sob o formato de *Plug-in*. Este programa, através da ligação de nós permite executar operações, gerar geometrias complexas e manipular a informação contida em modelos BIM, no Revit ou no próprio Dynamo [73, 74].

- **Grasshopper:**

  Analogamente ao Dynamo, Grasshopper trata-se de uma aplicação de programação visual baseada em Python, compatível com o Rhino3D sob o formato de *Plug-in*. A sua base de funcionamento é a mesma do Dynamo, através de nós e das respetivas ligações permite gerir a geometria e os dados de modelos BIM [75].

2.1.4.2.2. Slicing

- **Ultimaker Cura:**

  O *Ultimaker Cura* é um software de "*Slicing*" *open source*, disponível para várias plataformas, desenvolvido pela Ultimaker. A sua compatibilidade com os diferentes tipos de ficheiro de impressão, STL, OBJ, X3D e 3MF permite a sua utilização num número variado de impressoras. Para além de dividir um modelo em camadas, é possível também definir o material de impressão, a espessura das camadas, o preenchimento interior, a espessura de parede e a estrutura de suporte.

- **Simplify3D:**

  Desenvolvido pela empresa com o mesmo nome, o Simplify3D é um programa de corte de modelos para impressão destinado a utilizadores profissionais. O *software* é compatível com um elevado número de impressoras e à semelhança do Cura permite fazer a gestão do modelo, alterar a escala, rodar, ajustar o preenchimento interior e até reparar. O Simplify3D permite também alterar opções da própria impressão tais como a temperatura, controlo de espessura, etc.

2.1.5. Aplicações de 3DP na Construção

2.1.5.1. Para Maquetes

A construção de maquetes a partir de tecnologia 3D já vem sido implementada desde o início da década de 2000 [76]. Desde então, várias tecnologias de impressão foram experimentadas para a produção de maquetes. Em 2001 já eram testados os primeiros modelos de edifícios impressos. Nas primeiras tentativas a tecnologia FDM demonstrou ter dificuldades em suportar os esforços enquanto que a tecnologia SLS mostrou ser capaz de imprimir modelos rígidos [77]. Desde então estas tecnologias desenvolveram-se, aumentando a precisão de impressão e conseguindo melhores resultados. Apesar dos avanços na precisão da impressão, um dos principais obstáculos continua a ser recriar pequenos detalhes e estruturas com falta de suporte [76].

A impressão de maquetes pode ser aproveitada de várias formas, desde para produzir uma típica maquete demonstrativa, como uma maquete modular para demonstração de movimento, até uma maquete colorida para auxiliar a coordenação de projetos.

A utilização de ferramentas de fabricação aditiva para a produção de maquetes veio permitir a redução de tempo para a sua conclusão, reunir as capacidades técnicas para produzir formas complexas de execução difícil pelos meios tradicionais e deste modo, possibilitar a execução de vários modelos ao longo do projeto de um edifício [77].

A aplicação deste tipo de fabricação na produção de maquetes tem grande vantagem na produção de modelos de estruturas, tal como na Figura 15 e de modelos desmontáveis representado na Figura 16.

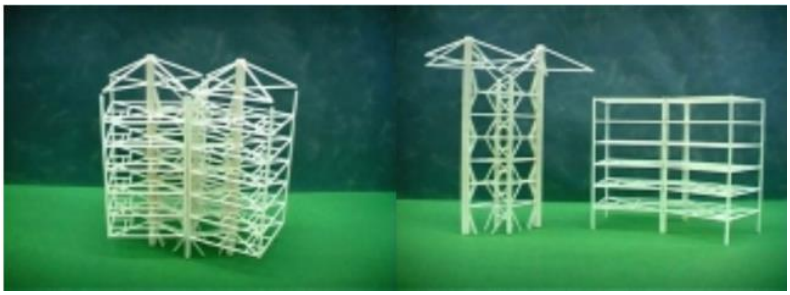


Figura 15 – Modelos de estruturas de edifícios [77].

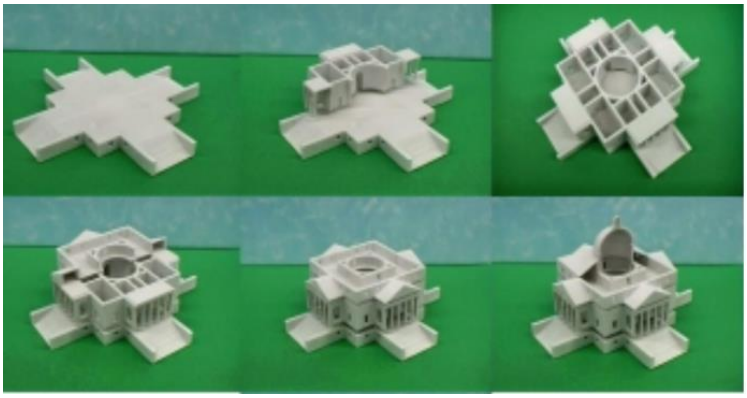


Figura 16 – Modelo desmontável [77].

2.1.5.2. Para Construção

A utilização de impressão 3D não se restringe apenas à prototipagem. Nos últimos anos verificou-se um desenvolvimento acentuado no aparecimento de equipamentos de impressão de grande escala e de aplicação direta em obra, seja pela produção de elementos construtivos, seja pela construção propriamente dita da infraestrutura. Os tipos de tecnologias desenvolvidas podem ser divididos em duas categorias: o *Binder Jetting* (Jato de Aglutinante) e o *Material Depostion Method* (Método de Deposição de Material, MDM) [25]. O princípio de funcionamento das duas categorias é o mesmo das impressoras até aqui abordadas. Através da deposição sucessiva de camadas de material são formadas geometrias mais complexas.

Relativamente ao primeiro tipo, o *Binder Jetting*, processo de impressão já abordado anteriormente, é um método que tem a capacidade de produzir formas complexas com estruturas sem suporte e com vazios [25, 78]. Atualmente, impressoras como a D-Shape (Figura 17), conseguem imprimir volumes até 6 x 6 x 6 m [79], com resistências de compressão até 235-242 MPa [80]. A grande vantagem da sua utilização, relativamente aos procedimentos tradicionais, está na capacidade de ser muito flexível no *design*, podendo obter formas complexas que seriam de muito difícil execução nos métodos convencionais [78]. Esta tecnologia tem, no entanto, apresentado algumas dificuldades em garantir um

nível de precisão muito elevado, fundamental para a sua utilidade principal e que tem impedido a sua utilização de forma mais generalizada [81, 82]. De momento, várias soluções para a resolução deste problema estão a ser estudadas, sendo desenvolvidas modificações no equipamento, novos materiais com propriedades mais adequadas e até estruturas de suporte compatíveis com este método de impressão [78]. Por exemplo, o cimento Portland, um material barato, com propriedades de grande resistência e estabilidade, bastante utilizado no setor da construção nos últimos 100 anos em todo o mundo, apresenta resultados limitados nos métodos de impressão 3D atuais. Este facto, leva com que atualmente a escolha recaia por outros tipos de cimentos como o cimento Sorel (magnesium oxychloride cement) [83] ou o cimento reforçado com fibra de polímero (*fiber reinforced cement polymer*) [84], entre outros. A sua utilização permite também a impressão de moldes de elementos construtivos a partir de scans ou de modelação em computador [85]. Deste modo, revela-se especialmente útil na restauração de edifícios ao permitir replicar detalhes de uma construção.

Figura 17 – Fotografia de impressora *Binder Jetting* de grande dimensão, D-Shape [86].

No que diz respeito à segunda categoria referida, a MDM tem um princípio de funcionamento semelhante ao do *Material Extrusion*, referido também anteriormente. A partir de um modelo digital, dividido em camadas 2D, o equipamento deposita material que à medida que é extraído deverá ter a capacidade de se autossustentar sem se deformar. Existem atualmente várias aplicações diferentes desta tecnologia, tais como o *Contour Crafting (CC)*, *Concrete Printing, Mesh-mould,* entre outros.

O CC (Figura 18) expele o material, como betão ou cerâmico, em camadas, que devido à sua elevada espessura são posteriormente alisadas para melhorar as condições de superfície. Deste modo consegue construir elementos em betão sem recurso a cofragens [76] mas tem o inconveniente de ter a tendência para produzir elementos com um nível de viscosidade variável [87, 88].

O *Concrete Printing* é outro método de impressão à base de extrusão de betão, bastante semelhante ao CC, desenvolvido na Loughborough University do Reino Unido [25, 76]. Este método utiliza argamassa como material primário. Quando comparado com o CC apresenta uma resolução de impressão menor, o que lhe permite um maior controlo da geometria interna e externa do produto [80]. Este método de impressão pode atingir até 100-110 MPa de resistência à compressão [76].

A *Mesh-mould* é uma tecnologia que permite a deposição de material polímero livremente num espaço 3D. Este material funciona como uma estrutura de suporte para o betão que é colocado posteriormente. Este método requer um tratamento de acabamento manual nas superfícies. A sua utilização é interessante na poupança de tempo para o desenvolvimento de estruturas complexas [25].

Figura 18 - Esquema de uma impressora do tipo *Contour Crafting [89]*.

Globalmente, o uso direto da impressão 3D na construção de edifícios está a permitir produzir estruturas em massa mais complexas e sem comprometer a possibilidade de personalizar de acordo com os requisitos do cliente. Todas estas mudanças são possíveis sem um aumento significativo do custo de produção. Este novo paradigma contrasta com a utilização da pré-fabricação de edifícios, ao permitir o projeto de estruturas únicas em cada edifício e não recorrer apenas a um número limitado de estruturas *standard*. Para além das mudanças estruturais possíveis com a impressão 3D, o processo de fabrico permite melhorar significativamente a produtividade e reduzir a produção de resíduos, uma vez que usa o mínimo material necessário [90], permite ainda reduzir a necessidade de mão-de-obra e reduzir os prazos de conclusão para apenas uma fração do tempo [76].

Os principais problemas encontrados na adoção da impressão 3D direta em obra estão relacionados com o material. O maior obstáculo é encontrar uma solução que permita com que a cura do material se processe mais rapidamente e que forme ligações mais fortes entre as diferentes camadas [91]. Outro desafio será encontrar o equilíbrio entre a precisão do equipamento e o prazo de conclusão de uma tarefa. Quanto maior for a precisão definida, maior será o tempo de deposição do material o que poderá ter implicações na cura do próprio material. O aumento das espessuras e posterior tratamento das superfícies como se verifica no *Contour Crafting* poderá ser uma boa solução para aumentar a velocidade de deposição do material [92]. Outras soluções poderão passar pela otimização do algoritmo de deposição do material, pela criação de impressoras maiores ou por aumentar o número de cabeças de deposição de material [91].

Alguns dos exemplos de utilização direta de impressoras 3D na construção de edifícios conseguiram obter resultados surpreendentes no prazo, no custo de mão de obra e na redução da produção de resíduos. Em 2014, uma empresa da Arquitetura chinesa produziu um grupo de várias casas de 200 m^2 em menos de um dia. Para tal, utilizou uma impressora com um volume de impressão de 150 x 10 x 6,6 m e capaz de produzir em horas, utilizando cimento de alta resistência e fibra de vidro [93]. A inclusão da fibra de vidro proporcionou uma resistência e uma durabilidade muito superior ao registado no tradicional betão armado [94]. Outro exemplo é o da construção de um escritório no Dubai, apelidado de "Escritório do Futuro". Para a sua construção, as peças necessárias foram impressas na China e enviadas para o Dubai. No total, toda a obra conseguiu reduzir os custos de mão-de-obra de 50% a 80% e a produção de resíduos de 30% a 60% [95].

2.2. BIM

2.2.1. INTRODUÇÃO

Building Information Modeling (BIM) é uma metodologia de representação digital das características físicas e funcionais de edifícios, segundo a qual é possível gerir informação sobre os mesmos durante todo o ciclo de vida, desde o projeto até à sua demolição [96].

Uma das características mais notórias do BIM é a representação geométrica a três dimensões. Esta informação é essencial para retirar cortes, vistas e também efetuar "*clash detection*" onde se consegue verificar a compatibilidade dos diferentes projetos. Outra característica fundamental do BIM é a atribuição de informação e de um significado a cada elemento, para além do seu formato geométrico. A partir da combinação destes elementos, que poderão ser paredes, portas, janelas, entre outros, é possível obter uma modelação parametrizada do edifício. Um modelo BIM pode ainda compreender objetos não físicos, como divisões, espaços e zonas, uma estrutura hierárquica dos projetos e ainda tabelas de quantidades, custos, entre outros. Por norma, os objetos modelados estão associados a um conjunto de informação relativa ao seu tipo de estrutura, material, especificações técnicas, custos, relações entre a componente e outras entidades físicas ou lógicas [97].

Deste modo, o BIM facilita o processo de integração dos diferentes projetos de especialidade e da obra propriamente dita. A utilização de um modelo único contrasta com a solução utilizada ao longo da história do setor, em que toda a informação era armazenada predominantemente sobre a forma de desenhos e memórias descritivas, quer no formato físico, quer no digital, e que em muitos casos acabava por se perder [97]. Esta perda de informação está associada às várias fases do ciclo de vida, no projeto, na construção, mas principalmente ao momento em que a informação é transmitida entre fases. Com a aplicação de ferramentas BIM, todo o processo de construção, como a coordenação de projetos, simulações, controlo de atividades, torna-se automático e imediatamente disponível ao utilizador (Figura 19) [97].

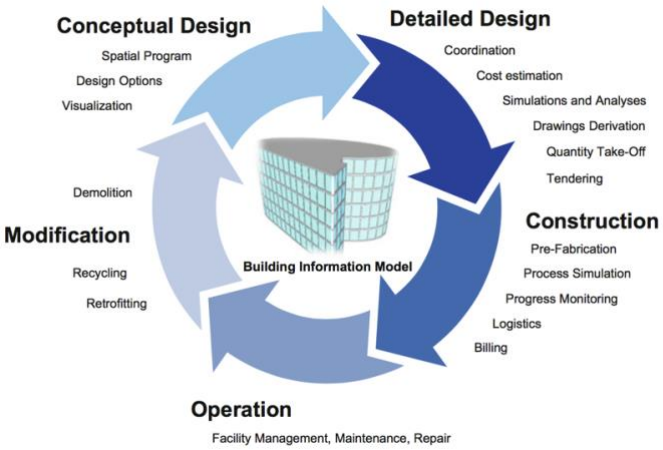


Figura 19 – O processo BIM ao longo do ciclo de vida de um edifício [97].

2.2.2. DOMÍNIOS DE APLICAÇÃO

2.2.2.1. Modelação para projeto e preparação de obra

A introdução da metodologia BIM na fase de projeto e na fase de preparação tem um potencial impacto significativo na fase de construção. Quando comparado com os métodos de trabalho tradicionais a duas

dimensões, o BIM revela-se como uma oportunidade para melhorar a qualidade, o detalhe e diminuir a quantidade de erros de um projeto.

A modelação paramétrica BIM de um determinado edifício permite obter cortes, vistas, alçados e plantas de forma automática e, acima de tudo, coerentes entre si. Outra oportunidade introduzida é da possibilidade de verificar possíveis colisões (*Clash Detection*) entre os diferentes projetos e elementos de cada projeto, em qualquer fase do processo construtivo. Devido à informação integrada em cada modelo associada com a geometria, material e outras propriedades de cada elemento, é possível de modo automático realizar simulações, tais como uma análise estrutural, análise da performance do edifício, de evacuação, analise de iluminação natural, entre outros. Atualmente já estão a ser utilizadas ferramentas semiautomáticas para o processo de licenciamento de um projeto a partir de um edifício modelado. Por conseguinte, com os resultados obtidos nos diferentes testes e simulações referidos, o projetista tem a possibilidade de efetuar as alterações necessárias ainda numa fase inicial [97].

Até este momento, os métodos tradicionais implicavam uma maior parte de quantidade de esforço e quantidade de trabalho em fases mais tardias, por vezes durante a própria execução da obra. Estes dados estão relacionados com a utilização de processos menos automatizados e mais sujeitos ao erro, de testes, simulações e de coordenação, o que por sua vez resulta em alterações do projeto apenas nas fases mais adiantadas de uma obra. No entanto, numa fase tão adiantada as alterações podem ser mais limitadas e o custo associado mais elevado [97].

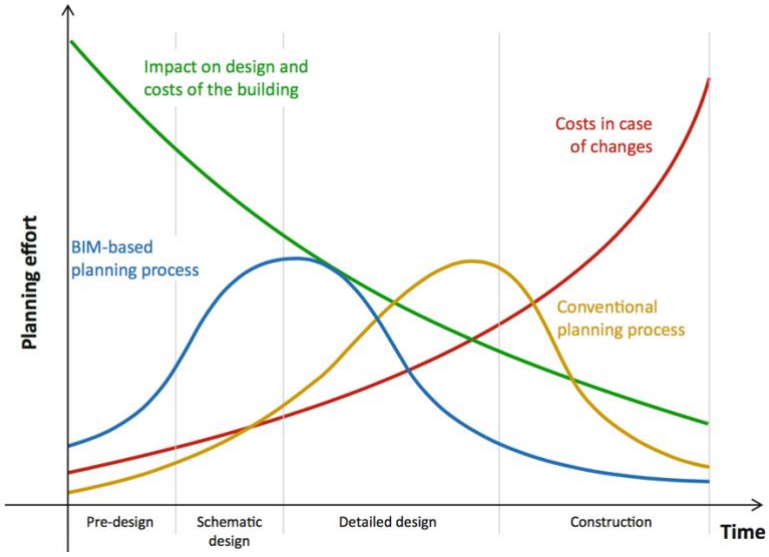


Figura 20 – Curva de MacLeamy [97].

Tal como é possível verificar na Figura 20, a adoção do método BIM implica uma redistribuição da quantidade de trabalho de todo o processo construtivo, aumentando significativamente na fase de projeto. Utilizando as ferramentas referidas anteriormente é possível tomar decisões menos suscetíveis de erro e mais cedo, numa fase em que o custo associado e as limitações técnicas são inferiores [97].

2.2.2.2. Modelação para pré-fabricação

A pré-fabricação refere-se ao ato de construção de elementos de uma estrutura em fábrica, seguido do seu transporte e montagem no local de destino. Este modo de construção difere da tradicional, em que

o material básico de construção é levado para o estaleiro e todo o restante processo é concluído no local [98].

A utilização de BIM apresenta um grande potencial de melhoria da produtividade de projeto, produção e controlo de qualidade na indústria da pré-fabricação. Uma das principais características da pré-fabricação é standardização de componentes, que são produzidas em escala numa fábrica e montadas em obra. O BIM oferece a possibilidade de criar bibliotecas de elementos, com a respetiva informação de propriedades e especificações associada, que poderão ser utilizados em vários projetos. Outra vantagem da integração do BIM com a pré-fabricação está na capacidade de simular o processo construtivo e de montagem [98].

Os recursos geométricos dos modelos BIM podem também ser importantes para a industrialização de componentes ao permitir a recriação física do modelo, seja por métodos subtrativos como o CNC, seja por métodos aditivos, pelo recurso de impressão 3D ou até por utilização de moldes de injeção [98].

Por fim, graças à quantidade de informação agregada em cada modelo, torna-se mais evidente a visualização de colisões e incompatibilidades na aplicação de componentes pré-fabricadas [98].

2.2.2.3. Modelação para construção

Tal como a etapa de projeto e de preparação, o BIM também permite introduzir mudanças no processo de construção. Recorrendo ao modelo do edifício, é possível calcular com mais precisão todas as tarefas, custos, prazos para a realização de todas as especialidades da obra [97].

A integração do modelo com o fator tempo associado, denominado de 4D *Building Information Model*, permite validar a sequência de tarefas do planeamento da obra, com o respetivo horário, local e evitar incoerências, colisões de tempo e local e agilizar a logística [97].

A adição do fator custo ao modelo referido dá-se pelo nome de modelação 5D. Analogamente ao modelo 4D, tem toda a informação relativa ao tempo, mas em cada tarefa e cada material tem um custo associado. Deste modo, é possível estabelecer uma evolução temporal dos custos e comparar os resultados reais com os esperados [97].

2.2.2.4. Modelação para utilização

A etapa mais longa do ciclo de vida de um edifício é o da sua utilização. Para se retirar o máximo proveito da metodologia BIM nesta fase, é de extrema importância a disponibilidade de um modelo do projeto bem organizado, que contenha toda a informação relevante até à etapa da construção, inclusive [97].

Um modelo completo permite que, ao longo dos anos de utilização, a informação relativa aos diferentes projetos esteja facilmente acessível. O utilizador pode consultar dados relativos aos diversos elementos do edifício, tais como a garantia e períodos de manutenção de equipamentos. Um exemplo prático da utilidade do modelo BIM nesta fase é a utilização do modelo como base para intervenções de renovação do edifício. Recorrendo ao ficheiro BIM é possível consultar todos os detalhes aplicados previamente. Para que a utilidade do modelo se mantenha, é fundamental que o ficheiro seja modificado sempre que se registem alterações. Por fim, na fase final do ciclo de vida, aquando do período de demolição, o modelo poderá ser útil na identificação dos tipos de materiais aplicados no edifício e deste modo planear o seu destino [97].

2.2.3. WORKFLOWS PARA A IMPRESSÃO 3D

A utilização de modelos BIM para a impressão 3D requer um tratamento diferente dos modelos tridimensionais modelados em softwares CAD 3D, na medida em que os modelos BIM não são totalmente compatíveis com os requisitos de modelação 3D. Deste modo, a existência de um elevado detalhe e de uma grande quantidade de informação faz com que o utilizador tenha de selecionar os elementos a incluir no processo de impressão.

Relativamente às principais etapas do processo de impressão, mantêm-se as mesmas referidas no Capítulo 2.1.3.. As principais alterações surgem precisamente na etapa de modelação, que requer um tratamento adicional.

No que diz respeito à modelação, o típico modelo BIM apresenta um elevado número de elementos associados, que poderão ser ou não necessários para impressão. Deste modo, o utilizador deverá ser capaz de modificar o modelo de acordo com as especificações que pretende, sejam relacionadas com o nível de detalhe, com a secção do modelo pretendida e até mesmo prepará-lo funcionalmente para eventuais processos de divisão. O utilizador deverá ter presente a representação visual do modelo impresso. Elementos como vidros, terreno, sapatas, entre outros, poderão não ser úteis para a impressão e inclusive anular o efeito visual pretendido.

De seguida, após preparado o modelo de impressão, o processo decorre de acordo com o processo abordado anteriormente. O modelo será exportado, possivelmente no formato STL, preparado para a impressão e impresso. Dependendo da tecnologia de impressão utilizada, o objeto resultante poderá ter de ser submetido a processos de tratamento.

3
DO BIM À IMPRESSÃO 3D: PROPOSTA DE PROCESSO DE TRABALHO

3.1. INTRODUÇÃO

O *workflow* da impressão 3D, tal como referido no capítulo anterior, é constituído por duas grandes fases, o pré-processamento e o pós-processamento. O processo de impressão a partir de modelos BIM difere principalmente no pré-processamento, na etapa de preparação do modelo após a sua modelação.

O típico modelo BIM é desenvolvido para tirar partido da sua forma geométrica e aglomerar vários tipos de informação sobre a mesma. Desta forma é usual cada modelo apresentar-se dividido num número elevado de elementos, que permitam organizar a informação de modo mais natural. Contrariamente aos modelos tridimensionais do tipo BIM, o objeto modelado para uma impressão 3D encontra-se, idealmente, totalmente interligado com o menor número possível de divisões e com o menor número de vazios no seu interior, o que assim resulta numa peça tão integra quanto possível.

A preparação do modelo procura não só a integridade do modelo como a sua adaptação para os diferentes tipos de utilização pretendidos. Para tal, ao longo deste capítulo serão sugeridos diferentes métodos de seleção, de filtragem dos elementos estritamente necessários e de modificações geométricas a implementar a um modelo. No esquema da Figura 21 é possível visualizar os diferentes procedimentos abordados ao longo do capítulo, respeitantes principalmente à preparação do modelo e da impressão. Todos os passos a partir da preparação do modelo serão similares aos de um *workflow* tradicional de impressão 3D, de acordo com o abordado anteriormente.

O presente capítulo contém uma descrição detalhada de cada uma das metodologias desenvolvidas, necessárias para a realização de uma impressão 3D a partir de um modelo BIM. Nesta descrição encontra-se incluído um conjunto de rotinas automáticas para a preparação geométrica, bem como uma série de recomendações para os processos manuais sempre que estes sejam necessários.

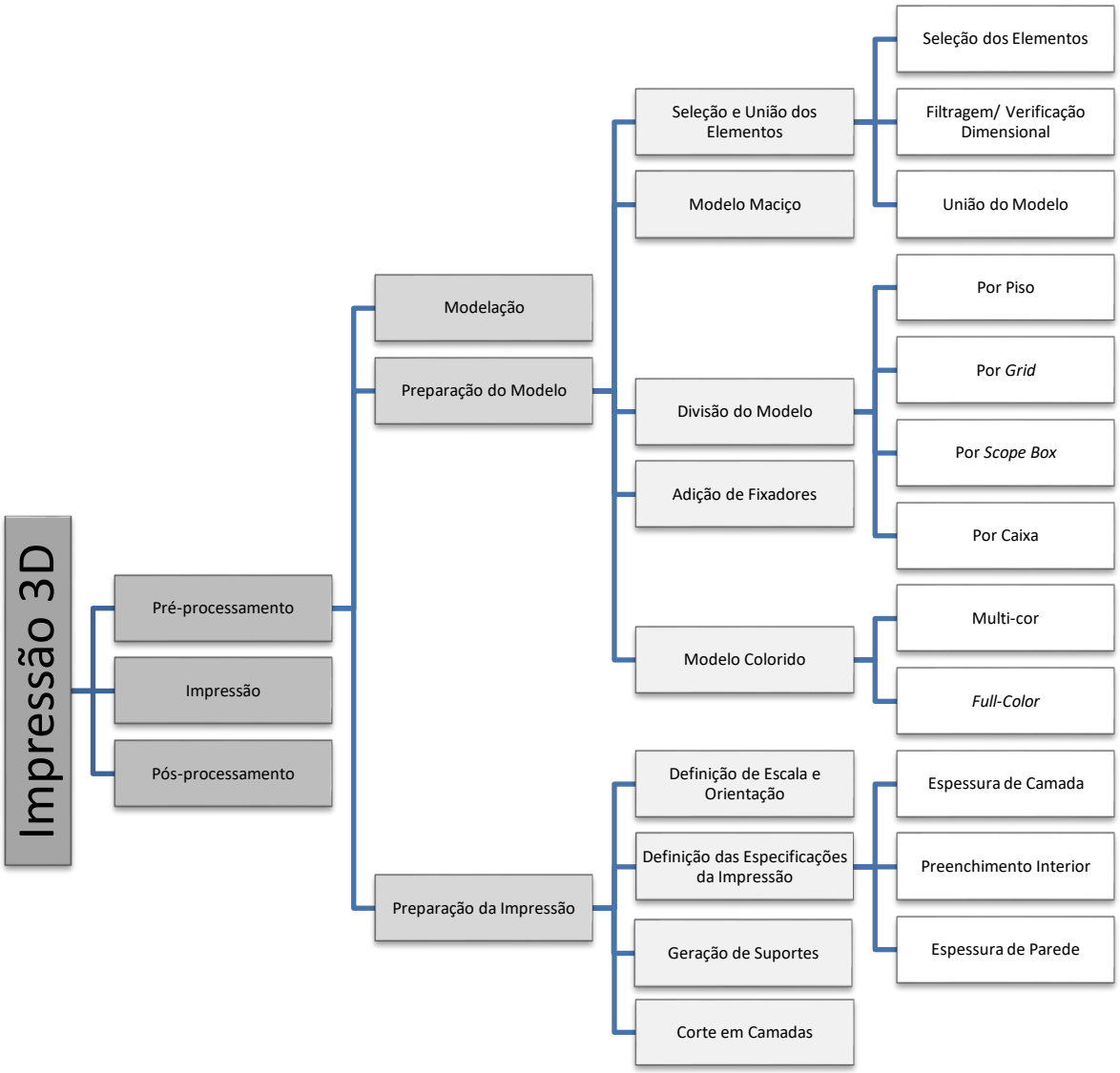


Figura 21 - Esquema do processo de impressão 3D para modelos BIM abordado neste capítulo.

3.2. Preparação do Modelo para Impressão

A preparação de um modelo desenvolvido num software BIM requer um variado número de alterações. Neste capítulo aborda-se a seleção dos elementos a incluir, a verificação da compatibilidade da sua geometria com as especificações da impressora 3D, a verificação da integridade da peça e a modificação, se necessário, da geometria a incluir no processo de impressão. Na Figura 22 está representado um fluxograma com uma sugestão da sequência de tarefas da preparação de um modelo BIM para uma impressão 3D.

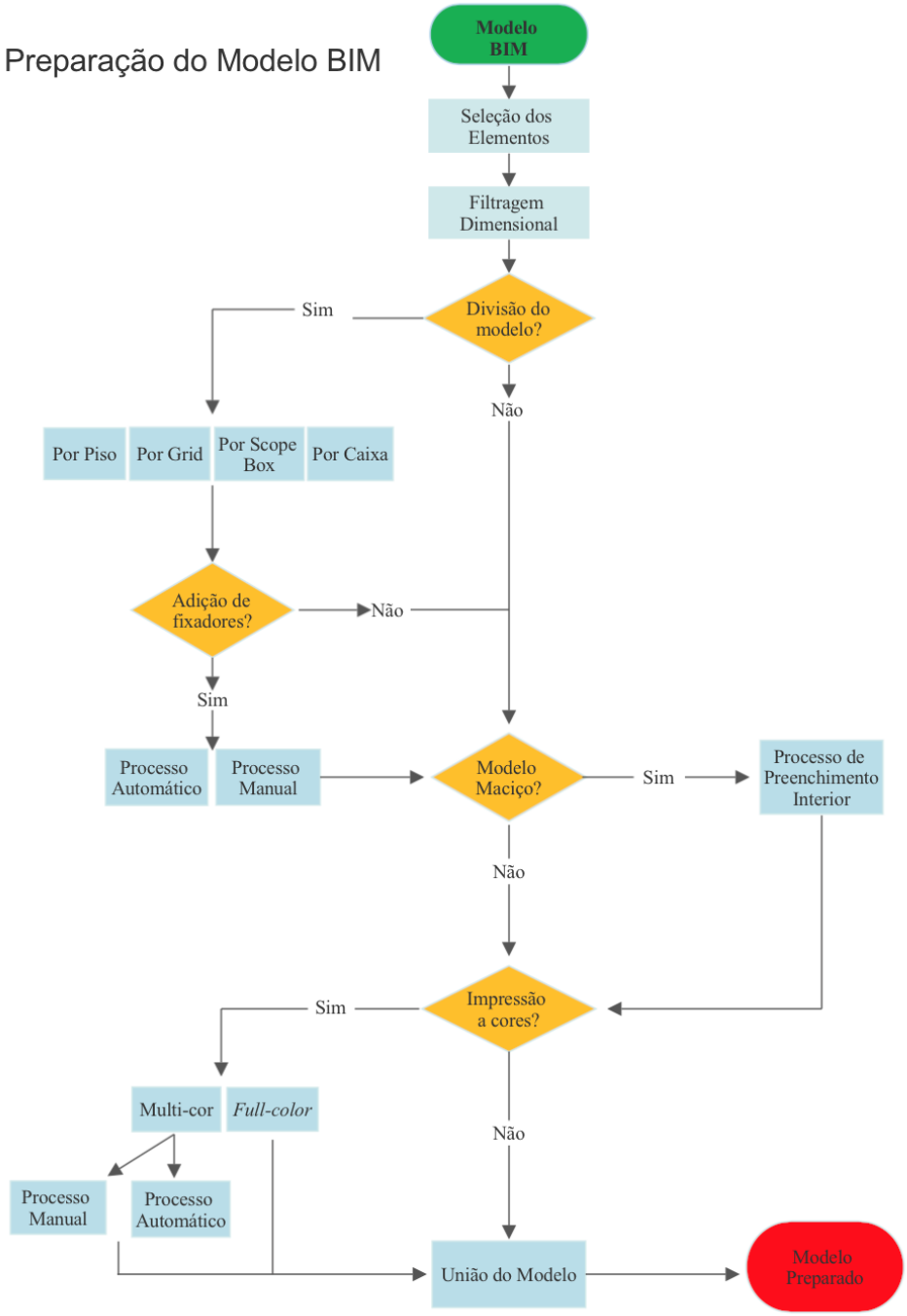


Figura 22 – Fluxograma do processo de preparação do modelo BIM para impressão 3D.

Tal como apresentado no fluxograma da Figura 22, o processo de preparação está organizado numa sequência de etapas, pelo qual cada modelo poderá passar ou não. De modo sintético cada um dos processos desenvolvidos neste capítulo pode ser descrito da seguinte forma:

- Seleção dos Elementos: Modo de agrupamento dos diferentes elementos constituintes de um modelo BIM a integrar uma impressão, com base nas suas características geométricas e na escolha do utilizador.
- Filtragem Dimensional: Processo automático de verificação das dimensões de cada elemento constituinte do modelo. São avaliadas a largura, comprimento, altura e volume de cada peça pertencente aos diversos elementos selecionados.
- Divisão do Modelo: Conjunto de vários processos alternativos ou complementares de manipulação da geometria do modelo. São apresentadas várias soluções distintas de alteração geométrica tendo em vista operações básicas de corte ou segmentação.
    - Por Piso: Segmentação baseada nos níveis de referência horizontais dos elementos;
    - Por *Grid*: Processo de corte com base num sistema de eixos colocado no modelo BIM;
    - Por *Scope Box*: Processo de divisão baseado numa ferramenta BIM de criação de um paralelepípedo de seleção;
    - Por Caixa: Processo de divisão a partir da criação de caixa de seleção em forma de paralelepípedo em volta do modelo.
- Adição de Fixadores: Processo automático ou manual de adição de estruturas de fixação para os modelos divididos. São apresentadas várias alternativas de colocação de geometrias dos fixadores e para a criação das correspondentes aberturas.
- Modelo Maciço: Processo automático de preenchimento do volume interior de modelos BIM de modo a integrar os processos de impressão 3D.
- Impressão a Cores: Demonstração de metodologia de organização do modelo para a impressão a cores de acordo com o tipo de tecnologia utilizada.
- União do Modelo: Ferramenta de fusão dos vários elementos constituintes de um modelo de impressão numa única peça.

Todos os processos auxiliares (*scripts* de programação visual) desenvolvidos encontram-se descritos em detalhe no Anexo A.

3.2.1. Seleção e União do Modelo

3.2.1.1. Seleção dos elementos

O primeiro passo da preparação de um modelo BIM é a seleção dos elementos a incluir nas fases seguintes. A inclusão de um elevado número de elementos num modelo BIM resulta invariavelmente na inclusão de elementos com um grau de dificuldade de impressão elevado e/ou com uma utilidade representativa reduzida, que por essa mesma razão deverão ser removidos na fase inicial do processo de preparação. Para tal, uma opção passa pela utilização/criação de uma ferramenta que permita selecionar todos os elementos com base nas suas características físicas e na sua utilidade e filtrá-los relativamente aos requisitos impostos pela capacidade de impressão ou pelo nível de detalhe pretendido.

Deste modo, a partir de uma ferramenta do programa Revit denominada de "*Project Parameters*" é possível criar vários instrumentos de seleção dos elementos a incluir nas fases seguintes de preparação. Tal como se verifica na imagem seguinte, o processo de criação de um parâmetro do Revit inclui a definição da disciplina dos elementos abrangidos pelo mesmo, do tipo de parâmetro a criar (como por exemplo, do tipo *Yes*/*No*, Volume, Área, entre outros) e das categorias a incluir no parâmetro criado.

Como se pode observar na Figura 23, neste caso optou-se pela criação de um parâmetro denominado de "3D Printing", que visa a listagem dos elementos a incluir no processo de impressão, através do preenchimento de uma caixa de seleção *Yes/No*. Assim, por intermédio da seleção positiva do parâmetro, o Revit irá armazenar a informação dos elementos que o utilizador pretende ou não incluir na impressão 3D.

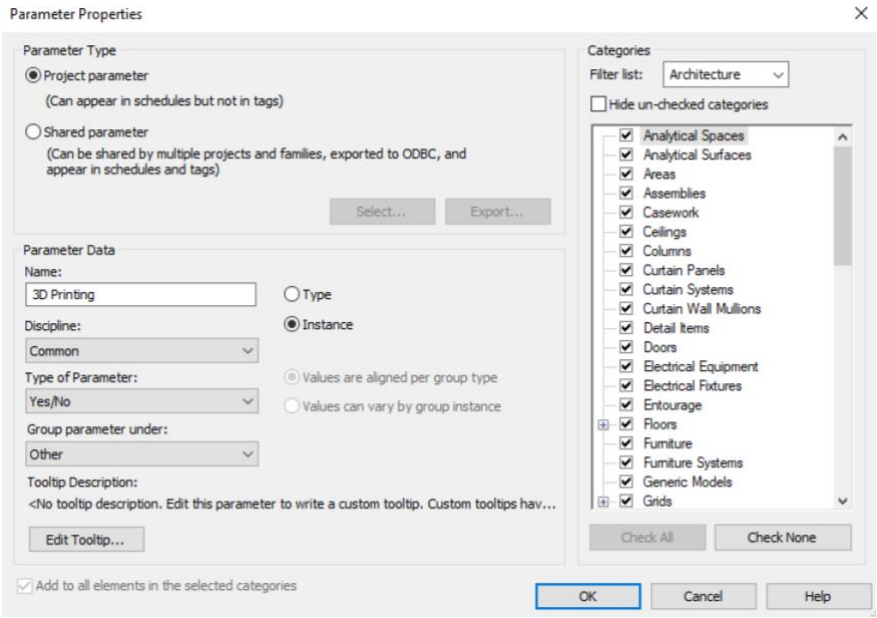


Figura 23 – Janela "*Parameter Properties*" no Revit.

De seguida, utilizando os parâmetros presentes no Revit e recorrendo às opções de visualização do documento é possível criar filtros de visualização (Figura 24), atribuindo cores e/ou ocultando os diversos elementos com base nas suas características e opções do utilizador (Figura 25).

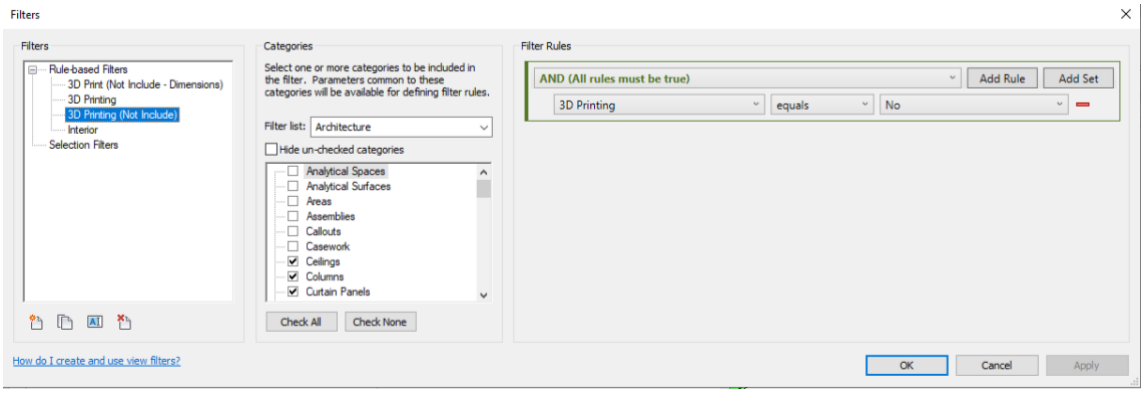


Figura 24 – Janela de criação do filtro de visualização, no Revit.

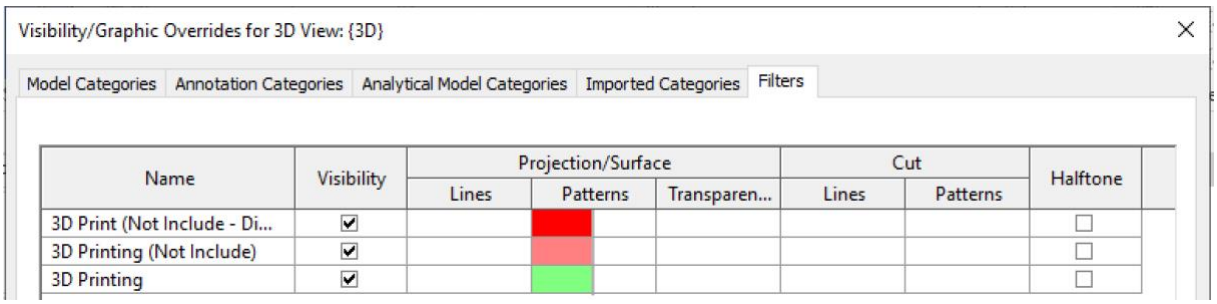


Figura 25 – Configuração dos filtros de visualização.

Tal como é possível observar na figura anterior (Figura 24), a criação dos filtros tem por base a seleção de regras relativas a cada um dos parâmetros pretendidos. Deste modo, a título de exemplo, criaram-se três filtros, dois dos quais relacionados com as opções tomadas quanto ao parâmetro de inclusão de impressão 3D (*3D Printing*) e um terceiro relativo às propriedades físicas de cada elemento, neste caso o volume e as respetivas dimensões, largura, comprimento e altura. Assim, atribuíram-se três níveis de cor, o verde e o vermelho claro para os elementos selecionados e removidos para impressão 3D, respetivamente, e por fim a cor vermelha forte para os elementos que não cumpram os requisitos dimensionais da impressão.

A partir deste tipo de ferramenta o utilizador pode optar por atribuir cores aos diversos elementos ou até mesmo optar por incluir ou excluí-los da visualização e do projeto. Na imagem que se segue (Figura 26) é possível observar um modelo com os filtros de visualização aplicados.

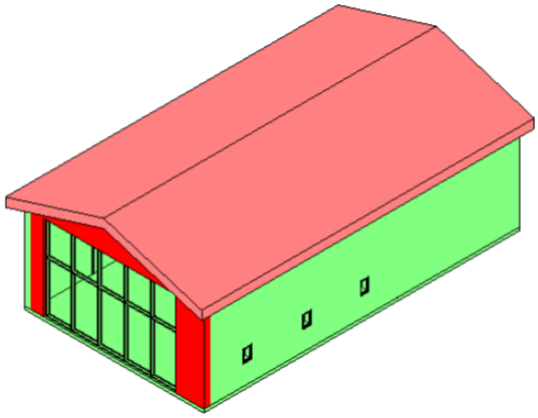


Figura 26 – Modelo 3D com os filtros de visualização ativos.

3.2.1.2. Verificação dimensional dos elementos

O passo seguinte na preparação do modelo para a impressão passa por verificar as dimensões de cada um dos elementos de acordo com as restrições da impressora a utilizar ou com o nível de detalhe pretendido para a impressão. A inclusão de elementos de dimensão inferior ao mínimo permitido pela impressora poderá significar não só a sua ocultação do modelo impresso como também o surgimento de possíveis deformações da geometria original, na sua preparação. Para tal, as dimensões relativas à espessura mínima e ao volume de cada objeto deverão ser testadas em cada um dos elementos. Todos que não cumpram os requisitos deverão, consequentemente, ser listados e assinalados num parâmetro criado para o efeito, denominado de "*Printability (Dimensions)*" e "*Printability (Volume)",* por exemplo. Deste modo o utilizador consegue ter a perceção dos elementos que poderão causar dificuldades de impressão e agir adequadamente, removendo-os ou não.

O Revit e o Dynamo não dispõem de nenhuma ferramenta nativa que automaticamente seja capaz de listar a espessura mínima de todos os tipos de elemento de um projeto. Para tal foi criado um *script* que verifica, por um lado as dimensões de um paralelepípedo com o volume necessário para circunscrever totalmente o objeto tridimensionalmente, a *bounding box* (caixa de contorno), e por outro o volume real da peça.

No que diz respeito à verificação das dimensões da *bounding box*, esta trata-se de uma ferramenta nativa do Dynamo que traça o paralelepípedo com as características descritas acima. Para obter a caixa de contorno dos elementos em análise é necessário primeiro importá-los para o Dynamo, através de qualquer um dos métodos a descrever mais adiante no ponto 3.2.1.3.. Uma vez listados todos os elementos e selecionada a sua geometria, é então criada uma *bounding box* envolta de cada um dos elementos. É importante que o número de elementos importados corresponda ao número de *bounding boxes* criadas.

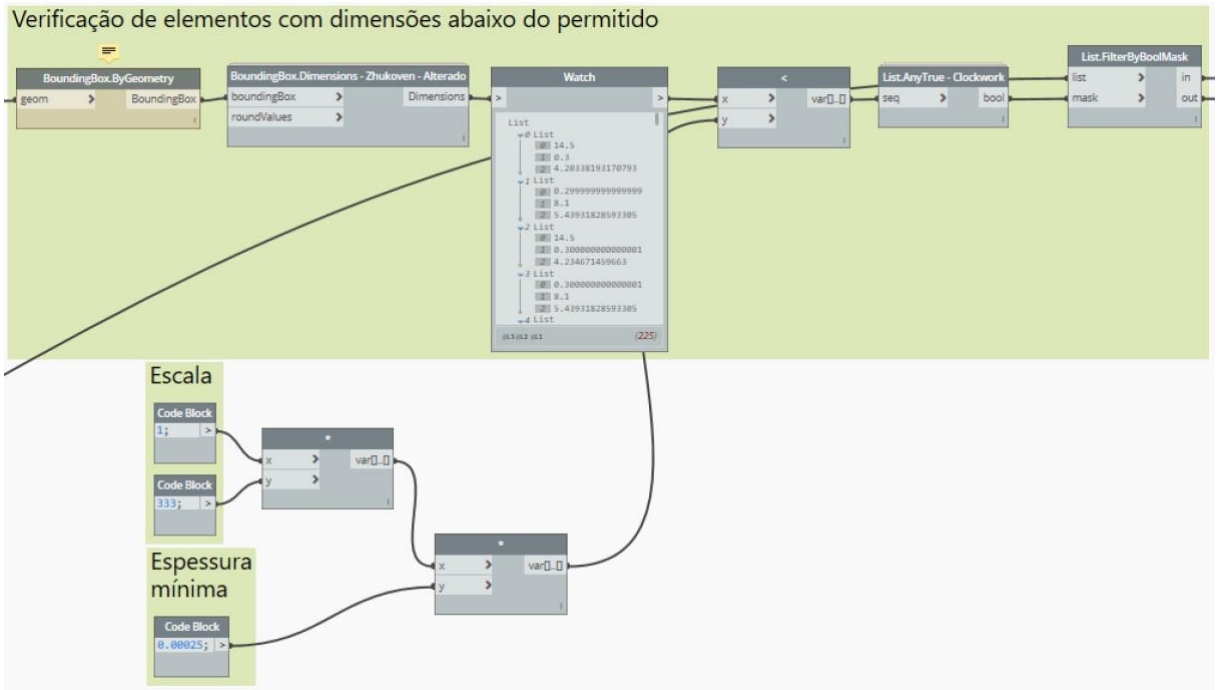


Figura 27 – *Script* de verificação dimensional.

De acordo com as ferramentas de programação visual representadas na Figura 27, é listada a informação relativa às dimensões geométricas de cada caixa de contorno, nomeadamente, a sua largura, comprimento e altura.

A partir da lista criada, a espessura mínima pretendida para a impressão (convertida para as unidades de projeto) é comparada com cada uma das três dimensões da totalidade das caixas de contorno. Todos os elementos cuja caixa de contorno apresente pelo menos uma das dimensões inferior ao mínimo imposto são assinalados e descartados.

Por fim, de acordo com o resultado obtido para cada um dos elementos, o Dynamo é instruído para estabelecer uma indicação ao parâmetro previamente criado no Revit "*Printability (Dimensions)",* relativo à capacidade de imprimir o elemento em causa. Como é possível visualizar na Figura 28, a lista que correspondente aos elementos reprovados no teste é assinalada negativamente no parâmetro referido.

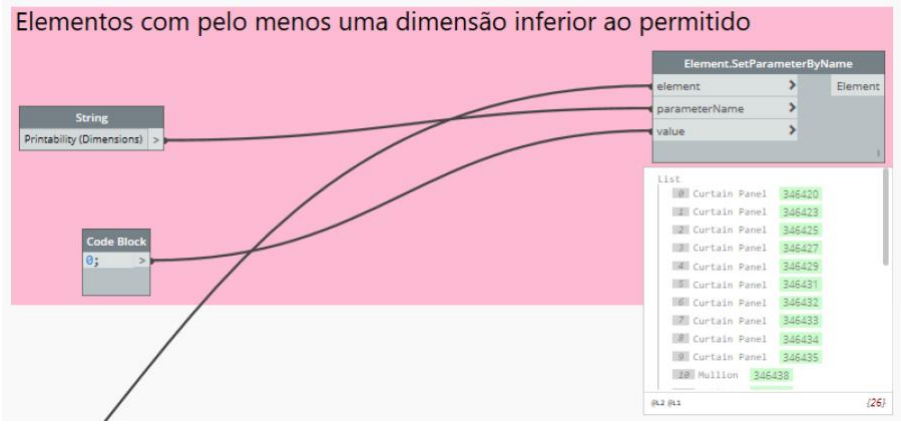


Figura 28 – Excerto do *script* de verificação dimensional.

Este método de verificação não é 100% eficaz, uma vez que a *bounding box* é sempre disposta ortogonalmente aos eixos X,Y, o que leva a que conforme a orientação e o formato do elemento, a sua geometria possa traduzir-se numa caixa de contorno de dimensões muito superiores às do próprio elemento. No entanto, todos os elementos que não cumpram a verificação terão de facto os valores de pelo menos uma das suas dimensões abaixo do mínimo exigido.

Relativamente à verificação referente ao volume (Figura 29), esta vem ajudar a restringir os elementos de dimensões reduzidas, evitando que elementos que porventura passem a verificação mencionada anteriormente não sejam selecionados. Através de um funcionamento análogo à verificação das dimensões, o *script* de verificação de volume seleciona os elementos que possuem um volume inferior e superior ao mínimo exigido em duas listas separadas. A partir destas listas, define-se o valor do parâmetro de capacidade de impressão "*Printability (Volume)",* como negativo ou positivo.

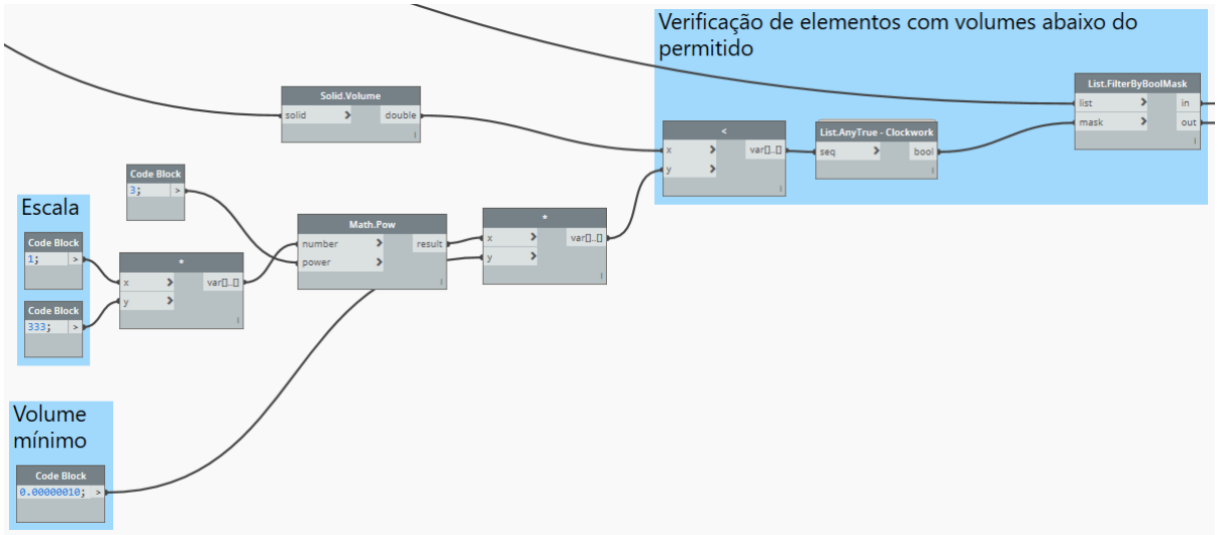


Figura 29 - Excerto de *script* de verificação dimensional.

Após os valores dos dois parâmetros referidos serem definidos, poderá ser ativado o filtro de visualização abordado no ponto anterior, que assinala a vermelho forte (ou qualquer outra cor à escolha) todos os elementos que não cumpram a verificação relativa às suas dimensões e/ou ao seu volume.

3.2.1.3. Análise de Integridade – União do modelo

Uma vez definido o conjunto de elementos a incluir no modelo de impressão, é essencial garantir a união do modelo no menor número de peças de modo a formar uma peça tão integra quanto possível e com o menor volume de vazios indevidos. Em termos conceptuais, o modelo BIM é dimensionado para uma decomposição das diferentes estruturas principais em estruturas menores que permite um maior detalhe geométrico e uma melhor organização da informação associada. Contrariamente, os modelos tradicionalmente projetados para a impressão 3D são modelados de modo a resultar numa peça única se possível, sem vazios não intencionais, nem repetição e sobreposição de faces e vértices. Este tipo de repetição pode resultar numa conversão para STL mais complexa e na ocorrência de erros, tais como o aparecimento de buracos e deformações nas superfícies do objeto. Na Figura 30, apresenta-se um modelo antes e depois da fusão dos seus elementos.

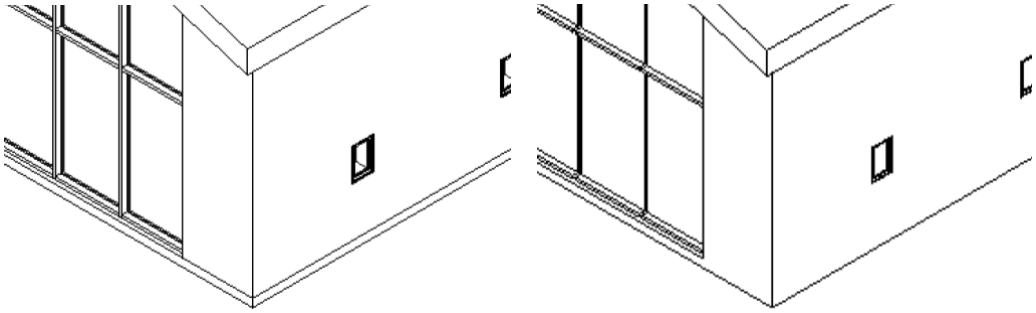


Figura 30 – Modelo antes e depois da união dos elementos.

Para evitar os erros mencionados, a geometria dos diferentes elementos do modelo deverá ser unida recorrendo a um de vários métodos, dos quais se inclui a programação visual do Dynamo (Figura 31). Este processo deverá ocorrer no final da preparação do modelo. Existem vários métodos de

processamento do modelo, sendo que nesta tese serão abordadas duas soluções, uma a partir da importação direta dos elementos do projeto para o Dynamo e a segunda a partir da conversão do modelo para um formato puramente geométrico "SAT" e da sua importação para o Dynamo. Uma vez importada a geometria para o Dynamo, o processo de união aplicável nos dois métodos é o mesmo.

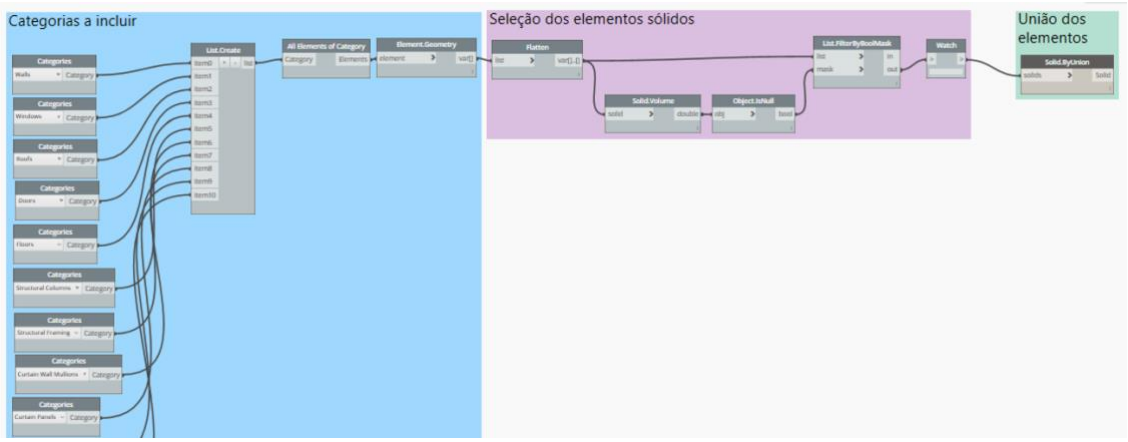


Figura 31 – Panorama geral de um exemplo de um Script com união de elementos.

A importação dos elementos para o Dynamo tem como principal vantagem conservar toda a sua a informação associada, o que pode ser importante para gestão do próprio modelo. No entanto, este tipo de procedimento apresenta algumas falhas que podem limitar a união de vários elementos e dar lugar á ocorrência de erros que impedem todo o desenrolar do processo.

3.2.1.3.1. Importação a partir de geometria

A exportação do modelo no formato CAD para um ficheiro do tipo "SAT" permite obter um modelo puramente geométrico e livre de restrições de união, facilitando o processo de união dos diferentes elementos. A partir de uma função de importação de ficheiro "*File Path",* devidamente conectado a um nó de importação de todas as geometrias do ficheiro SAT, são importados e listados todos os elementos do modelo sobre a forma de elemento geométrico, como uma superfície, linha, ponto ou sólido. O processo descrito encontra-se exemplificado na imagem da Figura 32.

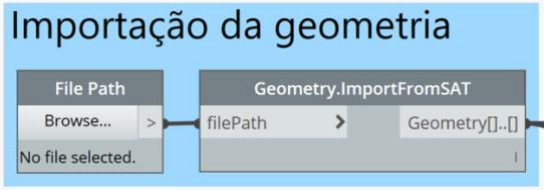


Figura 32 – Exemplo de importação geométrica, a partir de ficheiro "SAT".

3.2.1.3.2. Importação direta do Revit

No método de importação direta dos elementos do Revit para o Dynamo começa-se por selecionar os elementos a partir da sua seleção direta no projeto, ou das categorias correspondentes pretendidas ou dos níveis associados, entre outros. De seguida, lista-se todos os elementos obtidos. A partir de ferramentas de seleção de geometrias como "*Element.Geometry"* ou "*Element.Solids"* retira-se a informação geométrica correspondente a cada um dos elementos listados. Um exemplo de importação direta de elementos Revit encontra-se na Figura 33.

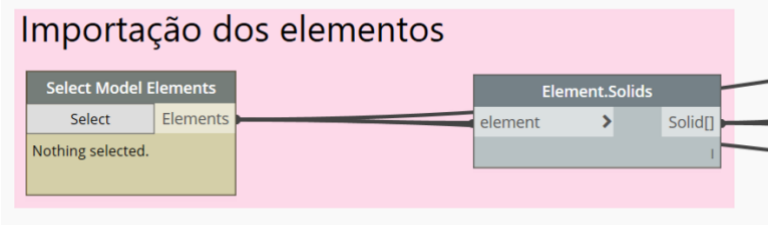


Figura 33 –Exemplo de importação direta de elementos Revit pela sua seleção no projeto.

A partir deste momento, ambos os métodos apresentam um tramo comum que consiste na exclusão de todos os elementos que não sejam sólidos, podendo estes ser superfícies, linhas ou pontos. A eliminação deste tipo de geometria contribui para a integridade do modelo uma vez que a tecnologia de impressão 3D apenas tem a capacidade de reproduzir volumes.

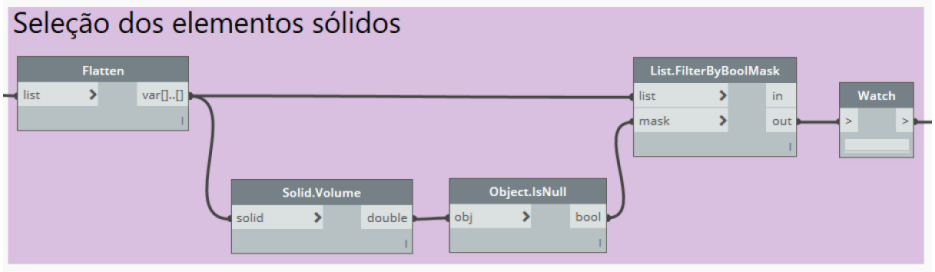


Figura 34 – Exemplo de processo de filtragem de geometria sólida.

Recorrendo a uma operação de cálculo de volume, são filtrados todos os elementos que correspondem a um valor diferente de "Nulo". No exemplo da Figura 34, a partir de uma função denominada de "*List.Filter.ByBoolMask*", separa-se da lista principal todos os elementos cujo índice, corresponda a um elemento não sólido. Por fim, a partir da função de união de sólidos "*Solid.ByUnion*" todos os sólidos listados são fundidos numa peça apenas que poderá ser importada novamente para o Revit ou utilizada para outras operações. Todas as adições de outros sólidos que porventura poderão ocorrer deverão ser sempre sucedidas de uma nova união que garanta a integridade da peça. Esta apenas é estritamente necessária no último passo de cada preparação.

3.2.2. Modelo Maciço

Uma vez assinalada a importância da integridade do modelo num único sólido, segue-se a preparação da geometria da peça com base nos objetivos delineados para o objeto. A impressão de um determinado modelo pode ter em vista um número variado de objetivos, tais como demonstrar visualmente o seu exterior, o seu interior, segmentar uma determinada estrutura, entre outros. O modelo deverá ser alterado de modo a garantir uma impressão mais sustentável em termos de desperdício de material e de tempo de impressão, preservando ao mesmo tempo a consistência da peça.

A impressão de um modelo cujo objetivo se trata meramente da sua representação exterior poderá ser feita diretamente a partir do modelo original, sem qualquer alteração geométrica. No entanto, a maior parte dos modelos produzidos em *softwares* BIM apresenta vazios no seu interior, o que obriga à colocação de estruturas provisórias de suporte para a impressão. A colocação deste tipo de estrutura provisória é quase inevitável em qualquer modelo produzido por processos de impressão 3D e não apresenta uma grande preocupação, uma vez que podem ser retirados no final. Contudo, no caso de um modelo de um edifício, os suportes adicionados no seu interior para além de não poderem ser retirados,

apresentam uma elevada densidade de material e a sua geometria não pode ser alterada automaticamente. Uma possível solução passa pela alteração da geometria interior do modelo, e pela atribuição de um volume interior que permita aos *softwares* de preparação da impressão reconhecerem o objeto como maciço e consequentemente fazer a gestão da percentagem de preenchimento interior que se pretende. Desta forma, o utilizador tem a capacidade de configurar a geometria e a densidade do interior da peça modelada e fazê-lo de modo instantâneo.

No exemplo da Figura 35 é possível verificar a diferença de padrão do preenchimento interior e do suporte (representado a amarelo). Para além do modelo maciço ter apenas uma percentagem de material a preencher o seu interior, também tem formas que facilitam os movimentos da impressora e que minimizam as mudanças de direção enquanto garantem a estabilidade do objeto.

Considerando o caso representado na Figura 35, um modelo com as dimensões 70,0 x 41,2 x 27,0 mm calculado para a impressora Ultimaker S5 no programa Cura tem uma duração de impressão estimada de 2 horas e 54 minutos e requer 29 g e 3,72 m de comprimento de material PLA para produzir o modelo. Para a versão do modelo com um preenchimento interior de 20% a mesma impressora estima 3,37 m de comprimento e 26 g de filamento e um período total de 2 horas e 3 minutos. Naturalmente, quanto maior for a percentagem de preenchimento interior, maior será o tempo de impressão e o respetivo material utilizado.

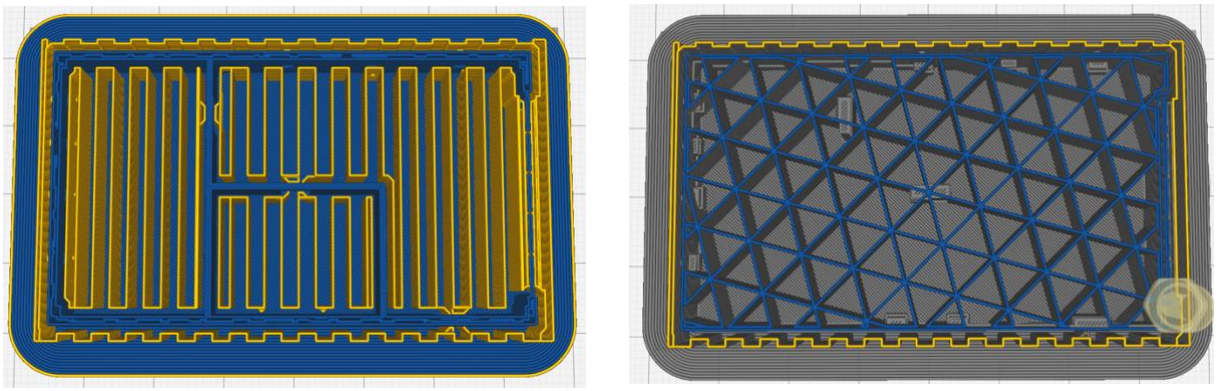


Figura 35 – Exemplo de percurso de impressão de tecnologia FDM para modelo simples e modelo maciço, respetivamente.

1º. - Modelação de Volume interior

O primeiro passo para a massificação do volume interior de um modelo de um edifício implica a criação de elementos da categoria "*Rooms*" ou outro equivalente. Com esta ferramenta é possível definir o volume interior de um determinado compartimento do modelo de modo automático no Revit. Para que o resultado esteja de acordo com o desejado, deverão ser definidas as condições de fronteira destes elementos, no plano horizontal a partir das paredes exteriores e divisórias, e no plano vertical a partir do teto e do pavimento. É desejável que o utilizador defina uma fronteira que limite o número de vazios ao longo do modelo, nomeadamente nos vãos envidraçados que poderão causar problemas. O utilizador deverá ainda ter precaução ao definir as zonas de limite superior e inferior de modo a que estes volumes não ultrapassem o próprio volume do espaço modelado. Deste modo, todos os espaços interiores deverão estar completamente definidos e abrangidos, tal como representado na Figura 36.

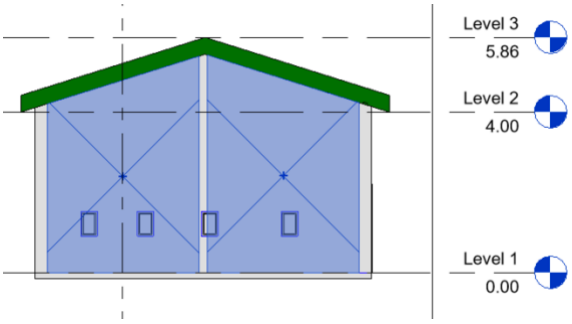


Figura 36 – Exemplo de "*Room*" modelado no Revit.

2º. - União de volume interior com modelo.

Uma vez modelado todo o espaço interior correspondente ao objeto a imprimir, é necessário unir a geometria resultante com o modelo correspondente criado de acordo com o processo descrito no ponto 3.2.1.. Para tal poderá ser utilizado o modelo resultante do processo mencionado ou apenas editado o *script* original com a adição das categorias correspondentes ao volume interior. Na descrição que se segue utilizou-se o *script* original como recurso inicial. Como é possível verificar na Figura 37, apenas foi necessário adicionar a categoria "*Room*" e a "*Space*", embora para cada modelo apenas seja necessária uma das categorias.

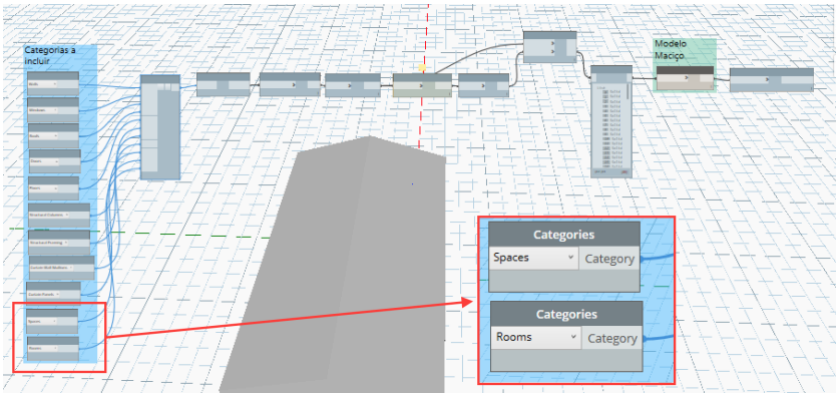


Figura 37 – *Script* de Criação de Modelo Maciço.

Por fim, o sólido resultante deverá ser novamente importado para o Revit, e feita uma análise cuidada da sua geometria. O resultado deverá estar de acordo com o da imagem da Figura 38.

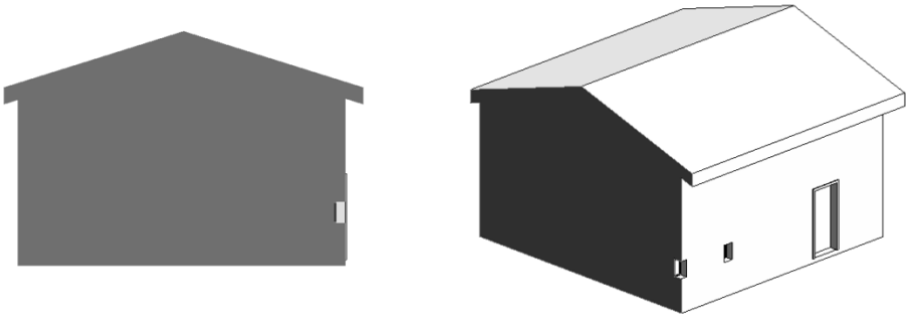


Figura 38 – Corte e Vista 3D de Sólido resultante no *Revit*.

3.2.3. Divisão do Modelo

À semelhança do processo de massificação do modelo, existem outros processos de manipulação da geometria do modelo BIM. A divisão do modelo desenvolve-se com uma ferramenta de fragmentação do modelo tendo por base um número variado de objetivos. Neste trabalho vai-se abordar a divisão por Piso, por *Grid*, por *Scope Box* e por Caixa.

Os métodos de divisão para os quatro tipos mencionados variam na base do seu funcionamento. Enquanto que, por exemplo, a divisão por piso exige que para além da informação geométrica, os elementos divididos disponham de informação relativa à sua posição, os restantes métodos apenas requerem a primeira. Deste modo é essencial que todo o modelo esteja modelado corretamente, isto é, que os elementos se encontrem devida e parametricamente associados aos respetivos pisos.

3.2.3.1. Por Piso

A divisão por piso trata-se de um método de fragmentação horizontal de modelos BIM. Entende-se por piso todo o nível marcado na horizontal com informação relativa à sua cota altimétrica. Para o bom funcionamento deste método de divisão é essencial que todos os elementos do modelo selecionados para a impressão estejam devidamente parametrizados e associados a cada um dos níveis. Na Figura 39 está representado um exemplo de um procedimento a aplicar e na Figura 40 a ferramenta de importação em detalhe.

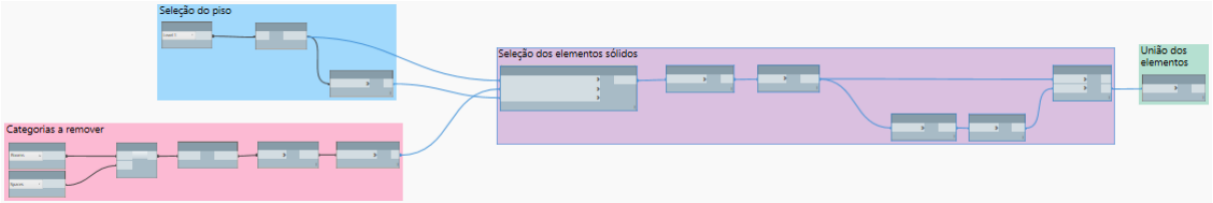


Figura 39 – Panorama geral do *script* de divisão por piso, a detalhar na imagem seguinte e em anexo.

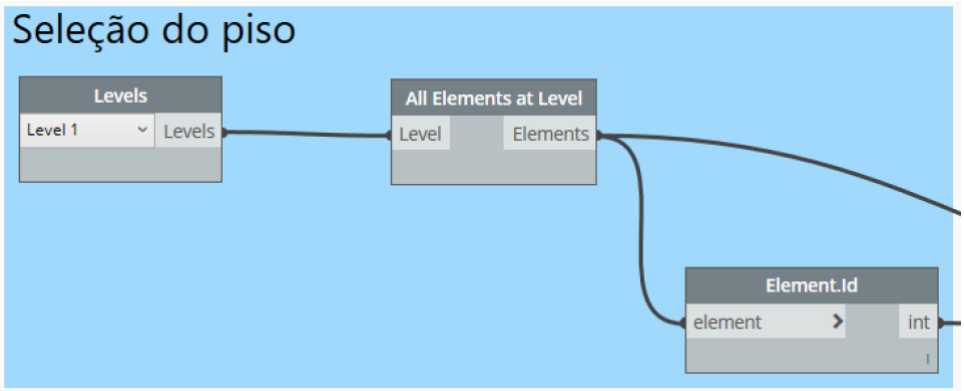


Figura 40 – Excerto do *script* de divisão de modelo por piso.

A metodologia de divisão do modelo por piso baseia o seu funcionamento na importação direta de elementos. O exemplo demonstrado na figura difere de todos demonstrados até este momento. Ao contrário do que se verificava nas diferentes versões até aqui abordadas, neste *script* começa-se por importar todos os elementos associados a um determinado nível, sem qualquer tipo de restrição para além do nível base relativo. Em simultâneo, são selecionadas as categorias presentes no modelo que não

se pretende incorporar na peça final. A título de exemplo, foram selecionadas as categorias correspondentes aos "*Rooms*" e "*Spaces*", mas pode ser adicionada qualquer outra. O processo de filtragem tem por base a seleção dos parâmetros de identificação (*ID)* associados a cada um dos elementos que incorporam a lista dos elementos do piso selecionado e dos elementos das categorias a remover. Deste modo, todos os elementos não pretendidos são removidos e procede-se à seleção da informação geométrica dos elementos correspondentes somente ao tipo sólido. Analogamente ao processo de união utilizado nos outros métodos, todos os sólidos filtrados são unidos e exportados para o Revit recorrendo à mesma técnica de seleção a partir de volumes nulos e não nulos.

A divisão do modelo mantendo toda a informação dos elementos presentes, permite a sua alteração e otimização para adição de outros elementos. Comparativamente a um método de corte puramente geométrico, a divisão através da seleção dos elementos associados a um nível tem a vantagem de assegurar que elementos que não estejam necessariamente dentro do espaço visado sejam também incluídos e que todos os elementos com altura variável não sejam indevidamente seccionados. A título de exemplo, um elemento como um pavimento, "*Floor",* é definido pela posição da sua face horizontal superior, pelo que num método de divisão meramente geométrica este tipo de elemento pode não ser incluído na medida em que o seu desenvolvimento é realizado para baixo do nível a que se encontra associado. Outro exemplo trata-se de paredes cuja altura da secção central ultrapassa o nível das secções das extremidades. A partir deste tipo de solução, um exemplo de um objeto resultante pode ser observado na Figura 41.

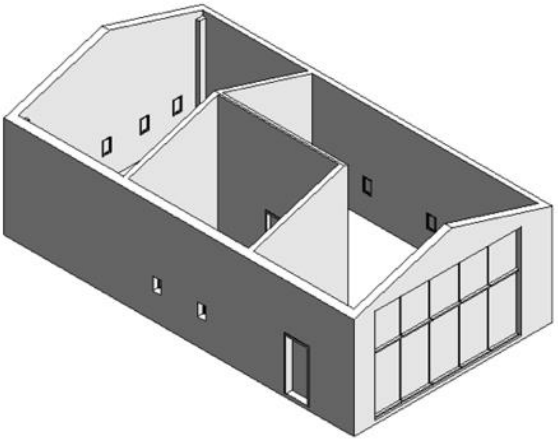


Figura 41 - Exemplo de peça obtida por divisão por piso.

3.2.3.2. Por *Grid*

A divisão por *Grid* segue uma metodologia de corte geométrico definido pelos seus limites. A *grid* ou eixo é uma ferramenta de anotação presente nas aplicações BIM para marcação de eixos paralelos entre planos horizontais e verticais. Este tipo de eixo pode ser marcado em qualquer direção e comprimento.

A divisão de um modelo com base nas referências *grid* marcadas no Revit aproveita o posicionamento destes eixos e a partir deles cria no Dynamo a forma geométrica correspondente. A sua utilização permite obter secções com formatos variados, dependentes do formato da sua base definida pelos eixos referidos. Quando comparado com as restantes formas de divisão abordadas nos pontos seguintes deste trabalho, a partir dos eixos selecionados é possível obter formatos resultantes da reunião e da intersecção das áreas selecionadas, colocadas de forma variada, personalizada e precisa.

1º. - Marcação da Grid

O primeiro passo na divisão de um modelo com recurso a esta ferramenta implica a marcação dos eixos pretendidos no modelo original. A sua colocação pode ser feita em qualquer uma das vistas em planta e poderá ficar visível nos diferentes níveis, sendo, portanto, uma ferramenta transversal a todo o projeto. Na Figura 42, é possível ver na imagem à esquerda a *grid* no software Revit e na imagem da direita as mesmas importadas para o Dynamo sobre a forma de *"curve"*. Este tipo de forma geométrica denominada de "*curve"* pode ser considerada uma linha curva, reta ou multidirecional.

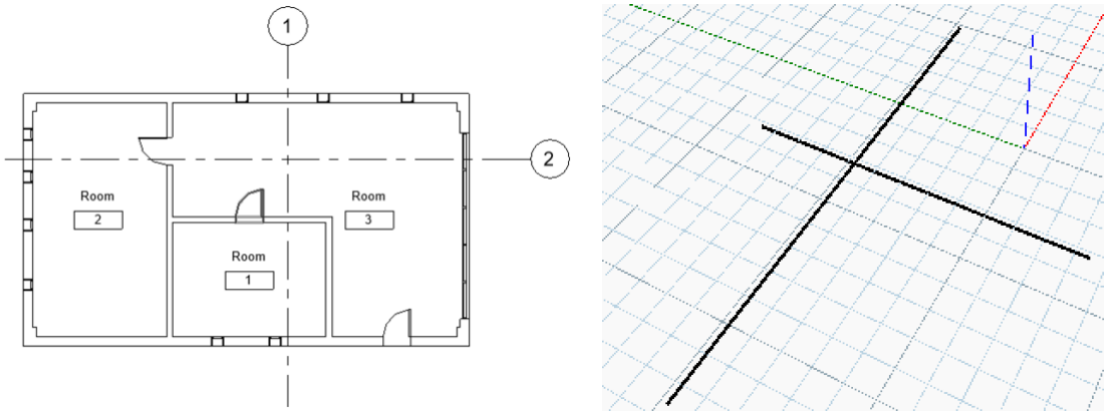


Figura 42 – Vista em planta da colocação dos eixos *grid* e em 3D no Dynamo.

2º. - Criação de sólido referente à região a selecionar.

O passo que se segue passa por transformar as retas de cada um dos eixos da *grid* selecionados num sólido tridimensional que abranja um dos dois lados relativos do eixo. Para tal, a metodologia desenvolvida implica a criação de um plano perpendicular ao plano XY, com uma dimensão segundo o eixo Z de acordo com a altura do edifício modelado e resultante da extrusão da *curve* associada.

De seguida procede-se à criação de um vetor com a direção da região pretendida. O princípio de seleção tem por definição o lado positivo correspondente ao lado direito e/ou ascendente no sistema de eixos cartesianos.

Uma vez criado o plano respetivo, procede-se à transformação do plano num sólido tridimensional definido pelo vetor mencionado anteriormente. Nas imagens que se seguem (Figura 43) é possível identificar os planos relativos aos eixos marcados e os respetivos sólidos.

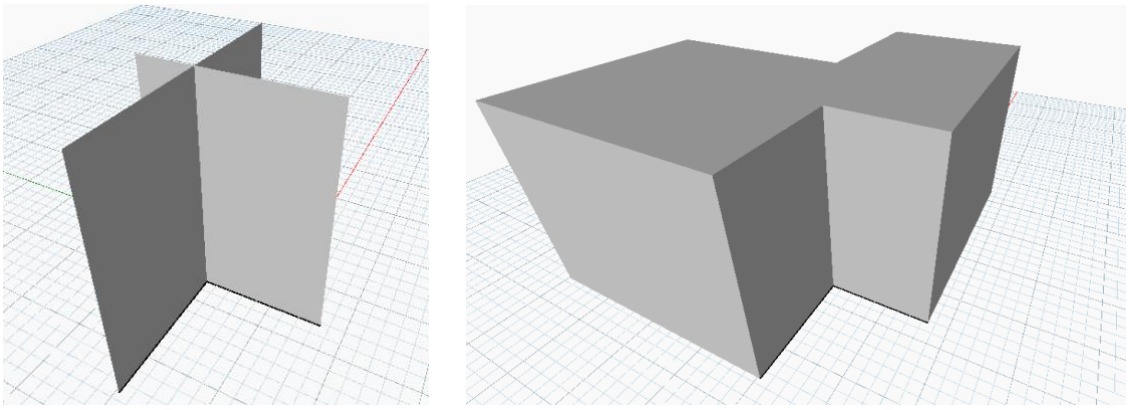


Figura 43 – Planos e sólidos formados a partir da marcação dos eixos *grid*.

Aquando da marcação dos eixos, independentemente da vista selecionada, as retas são sempre marcadas no plano Z≡0. Deste modo, todos os elementos que fiquem abaixo da elevação de 0 não serão abrangidos pela seleção. Uma solução encontrada para contornar o problema está na adição de um sólido simétrico no plano Z≡0, que permite abranger os volumes acima e abaixo deste plano.

Uma vez criados os sólidos, o Dynamo terá carregado toda a informação geométrica do modelo e todos os volumes de seleção.

3º. - Reunião e Intersecção de Volumes

Após todas as geometrias estarem devidamente definidas, o utilizador deverá optar pela secção do modelo que pretende. No caso de apenas estar a ser utilizado um eixo, a seleção apenas depende da direção positiva ou negativa da seleção, direita ou esquerda respetivamente. Já no caso de existirem dois ou mais eixos, o utilizador terá de selecionar não só a direção abrangida por cada eixo mas também a relação entre os volumes produzidos pelos diversos eixos, nomeadamente a sua reunião ou intersecção. Nos gráficos que se seguem (Figura 44) é possível visualizar na área colorida a verde as diferenças de seleção resultante em cada uma das relações. A partir do *script* desenvolvido, o cálculo dos dois casos é feito de forma automática, bastando ao utilizador a escolha do sólido correspondente a importar para o Revit.

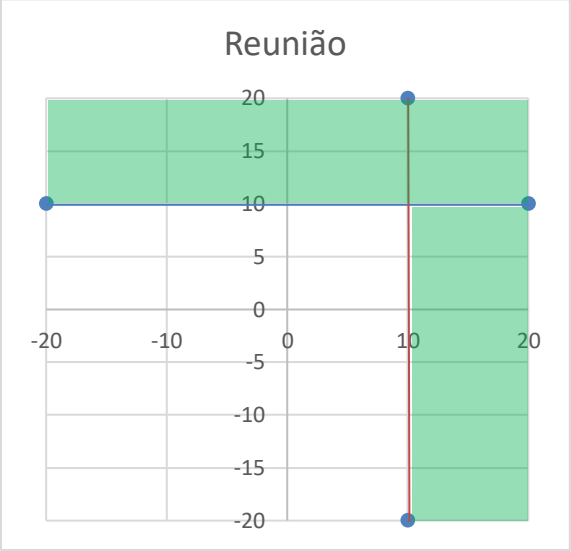


Figura 44 – Gráficos demonstrativos da região (a verde) selecionada no plano horizontal para a intersecção ou reunião.

Em termos de método de processamento do *script*, no caso de uma relação de reunião, o Dynamo apenas recorre a uma ferramenta de intersecção de geometria (*Geometry.Intersect*) entre o conjunto de sólidos obtidos a partir dos eixos marcados e do edifício modelado. O percurso de programação utilizado pode ser verificado na Figura 45.

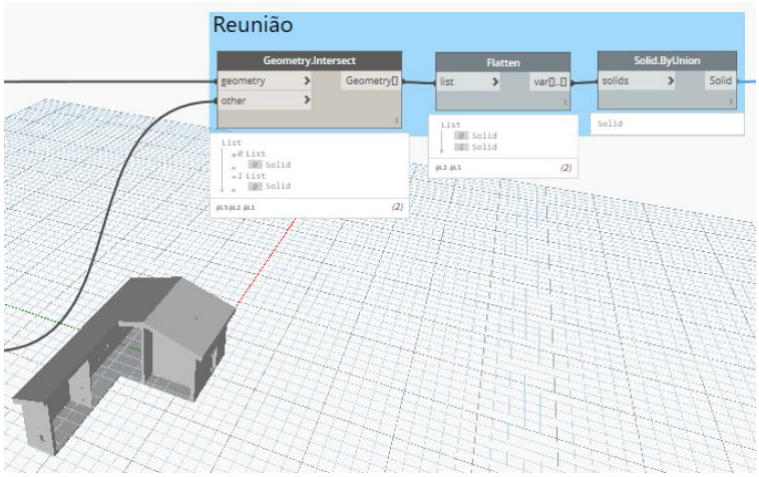


Figura 45 - Excerto do *Script* de secção por reunião e o sólido resultante.

No caso da intersecção, o percurso utilizado não é tão direto. O sólido resultante da união dos sólidos dos eixos é desintegrado e dividido nos sólidos correspondentes a cada eixo. A partir dos diferentes sólidos, é reduzido ao edifício modelado originalmente o volume correspondente a cada um dos eixos individualmente. De seguida, todos os sólidos resultantes que correspondem às áreas de modelo não abrangidas pela seleção definida pelo utilizador são novamente unidos e subtraídos ao modelo original. Deste modo obtém-se a secção do edifício correspondente à intersecção dos eixos dimensionados, tal como na Figura 46.

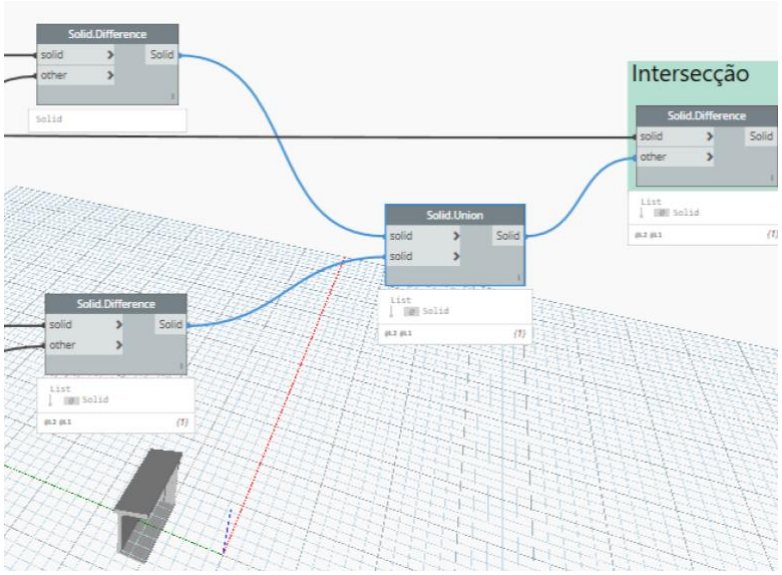


Figura 46 – Excerto do *script* de secção por intersecção e o respetivo sólido resultante.

3.2.3.3. Por *Scope Box*

A divisão do tipo por *scope box* surge a partir da utilização da ferramenta com o mesmo nome. Este tipo de ferramenta é utilizado para seccionar modelos, controlar a sua visibilidade e manipular outros parâmetros de visibilidade da região selecionada.

Este tipo de seleção apresenta um método de seleção mais natural, no sentido em que a mesma pode ser verificada no próprio modelo, no entanto, apresenta mais limitações quanto ao seu formato, que será sempre na forma de paralelepípedo. A divisão por *scope box* permite obter uma estrutura seccionada de modo mais intuitivo e imediato mas com um grau de adaptabilidade inferior ao método referido no ponto anterior.

1º. - Marcação da *Scope Box*

À semelhança dos processos anteriormente referidos, este método também se inicia pela marcação dos elementos necessários no modelo original. A divisão do modelo com recurso à utilização de uma *scope box* implica, antes de tudo, a marcação da mesma. Apesar de se tratar de um elemento tridimensional, a sua definição começa por se tratar apenas num plano bidimensional. Deste modo, a partir de uma qualquer planta pode ser marcada a área correspondente a uma qualquer das faces superior ou inferior da *scope box*. Uma vez delineada a face referida, o utilizador pode definir e editar a qualquer momento, qualquer uma das medidas do paralelepípedo correspondente à *scope box* em causa. No final deste passo, o resultado deverá ser semelhante ao da imagem exemplificativa da Figura 47.

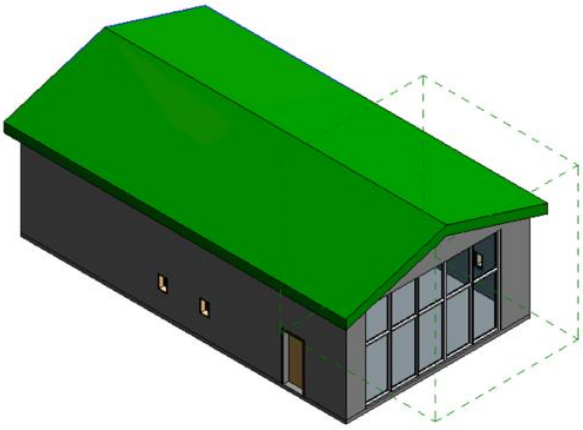


Figura 47 – Exemplo de *scope box* definida no Revit.

2º. - Geração de Sólido

Após a marcação da *scope box*, o processo prossegue no Dynamo. A *scope box* é uma categoria do Revit cuja forma geométrica é definida por um conjunto de arestas delimitadoras do seu volume (Figura 48). Ao importar esta informação para o Dynamo é possível obter os dados relativos às retas e pontos correspondentes, sendo que cada reta é definida pelo seu ponto inicial e pelo seu ponto final.

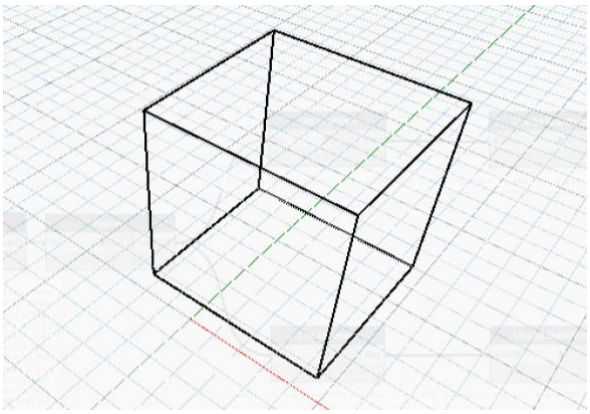


Figura 48 – Arestas da *scope box*.

O processo de criação de um sólido correspondente ao volume selecionado tem por base a criação de um elemento denominado de *"cuboid"* que corresponde a um paralelepípedo. Para tal é recolhida a informação relativa dos pontos opostos da *scope box*, o primeiro presente no ponto inicial da primeira reta e o oposto no ponto inicial da reta final. Com a definição destes pontos, é possível obter a distância relativa entre os dois pontos nos eixos X, Y e Z e assim definir todas as medidas do paralelepípedo coincidente com o volume da *scope box* (Figura 49).

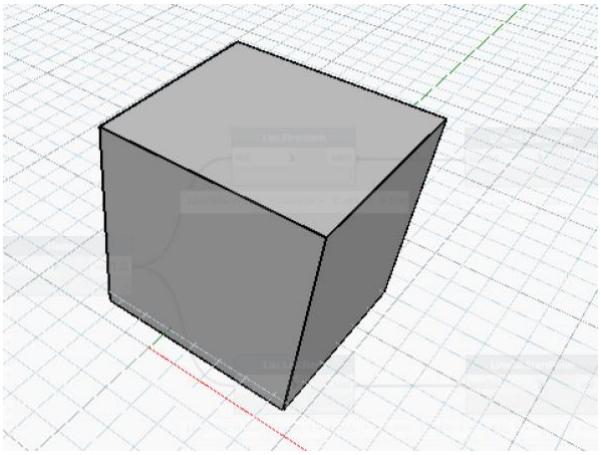


Figura 49 – *Cuboid* coincidente com a *Scope Box*.

3º. - Intersecção do modelo

Uma vez gerado o sólido da seleção pretendida, o utilizador deverá fazer a intersecção do mesmo com o modelo do edifício a seccionar. A importação da geometria do modelo poderá ser executada com qualquer um dos métodos utilizados nos capítulos anteriores. De modo a evitar o maior número de erros do tipo booleano, o mais aconselhável é a importação de modelos puramente geométricos, tais como o tipo SAT referido.

Quando os dois sólidos correspondentes ao modelo e ao volume selecionado estiverem definidos no Dynamo, bastará efetuar uma intersecção entre os dois, que resultará precisamente no modelo seccionado pelo volume definido pela *Scope Box*. Este passo está representado nas duas imagens da Figura 50.

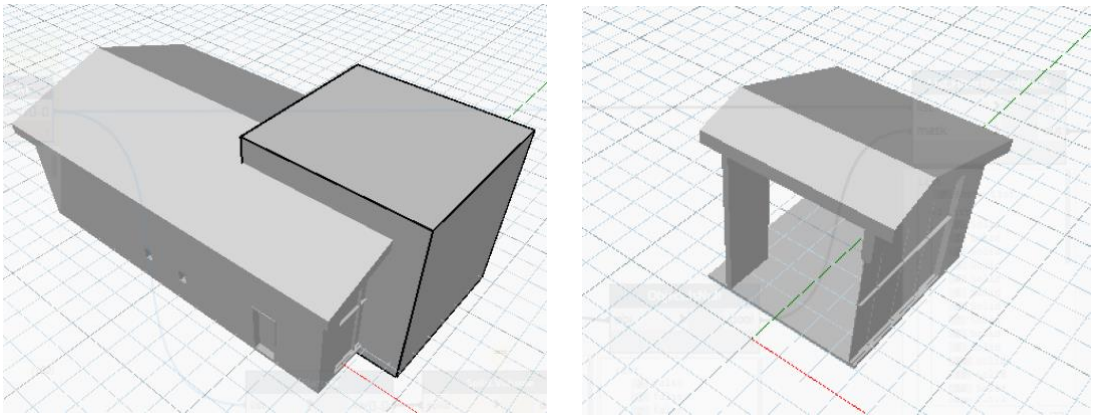


Figura 50 – Modelo e volume da *Scope Box*, antes e após a sua intersecção.

3.2.3.3.1. Outras Operações

A divisão a partir de uma *scope box* é menos manipulável quando comparada com a divisão por *grid*. No entanto, apesar de ser mais limitada, é também possível efetuar diferentes tipos de operações a partir da intersecção obtida no ponto anterior.

Duas das operações possíveis de obter, abordadas neste trabalho, tratam-se do exemplo da obtenção da geometria inversa à da seleção, e da união de várias secções correspondentes a várias *scope boxes*.

3.2.3.3.1.1. Redução do modelo.

A partir do Revit não é possível definir automaticamente uma *scope box* que exclua uma determinada secção do modelo. Como tal, no Dynamo, através da adição de uma operação de redução é possível obter o modelo resultante da eliminação do volume correspondente a uma determinada *scope box*. Na Figura 51, é possível verificar o modelo utilizado nas operações anteriores reduzido do volume obtido no ponto anterior. A mudança geométrica apenas implicou a adição de uma operação de redução do tipo *"Solid.Difference"*, que como o próprio nome indica subtrai a um determinado sólido, o volume o coincidente com um segundo sólido, neste caso o paralelepípedo criado a partir das arestas da *scope box*.

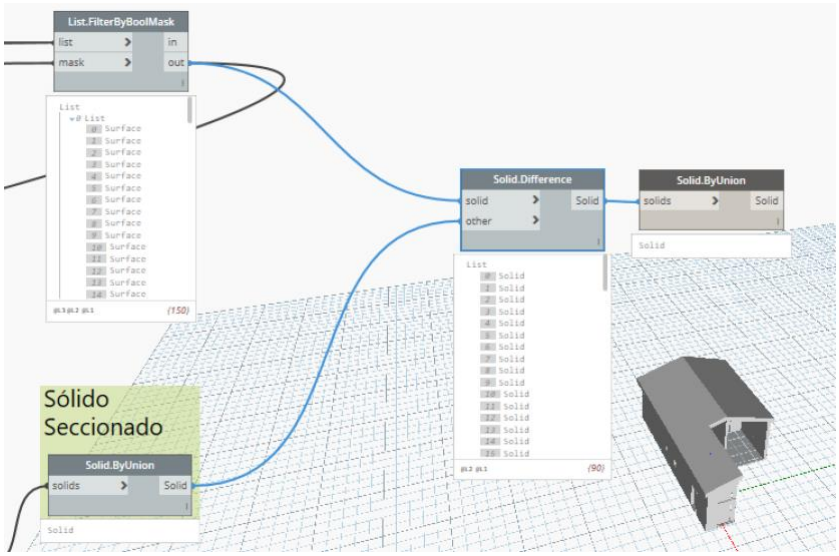


Figura 51 - Redução de modelo a partir de *scope box*.

3.2.3.3.1.2. União de várias *Scope Box*.

Outra limitação do Revit é incapacidade de definir uma *scope box* com secções não obrigatoriamente quadrilaterais. Uma forma de contornar este problema passa pela criação de várias *scope boxes* que uma vez unidas permitam obter um número mais elevado de formas.

Para obter estas formas é necessário adicionar ao *script* original uma operação de união entre os diferentes volumes criados a partir das diferentes *scope boxes* e por sua vez fazer uma intersecção do volume resultante com o modelo original, tal como no *script* original.

Na Figura 52, está demonstrada a operação de união dos diferentes volumes a partir da função "*Solid.Union*", que une todos os sólidos correspondentes. Por fim, de acordo com o método de processamento original, através da função de intersecção do Dynamo é obtido o modelo correspondente ao volume abrangido pela totalidade das *scope boxes* criadas.

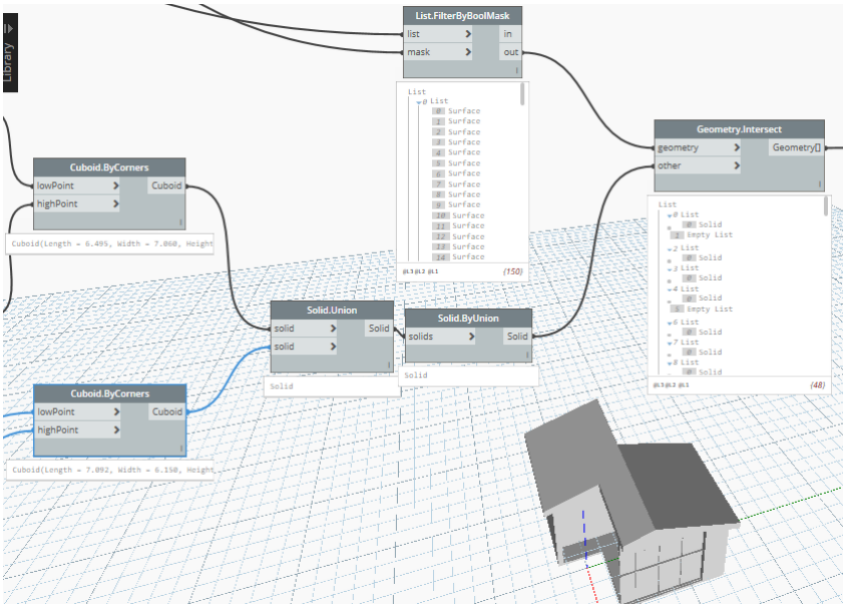


Figura 52 – Excerto do *script* de união de *Scope Boxes*.

3.2.3.4. Por Caixa

A divisão de modelos com recurso à utilização de uma caixa de corte permite obter modelos reduzidos por uma caixa com o formato de paralelepípedo colocado num qualquer vértice da caixa de contorno do modelo. A partir do modelo importado para o Dynamo, idealmente num formato puramente geométrico, é colocada uma caixa definida a partir de qualquer um dos oito vértices da caixa de contorno ou *bounding box*. Com a sobreposição da caixa ao modelo é possível obter um modelo reduzido ou a própria secção intersectada pela caixa, à semelhança das operações utilizadas nos outros métodos de divisão já abordados.

A utilização deste tipo de ferramenta permite a criação de um meio de seleção com opções de edição mais diretas, uma vez que toda a escolha dos parâmetros da caixa é feita a partir do próprio Dynamo. As principais desvantagens deste método são apenas permitir a divisão com base numa caixa de volume quadrilátero e não permitir definir os limites de seleção com uma precisão muito elevada.

1º. - Definição das dimensões da seleção

O primeiro passo na divisão de um modelo com recurso a uma caixa de seleção implica a importação do modelo propriamente dito. Uma vez importado o modelo, o processo inicia-se pela criação de uma *bounding box*, que se trata de um volume quadrilátero definido pelas tangentes das zonas limite do modelo nos eixos X, Y e Z.

Antes da criação da caixa de seleção, é necessário definir o seu ponto de colocação e as suas dimensões. A criação da *bounding box* dá origem à criação de oito vértices distribuídos por dois níveis. Deste modo, a criação da caixa implica a definição do nível pretendido, a partir do qual se define a caixa de seleção, sendo o nível 0 correspondente ao nível da base e o nível 1 correspondente ao nível do topo. A segunda seleção obrigatória trata-se da escolha do vértice a partir do qual se define a caixa, podendo o utilizador optar por um dos quatro vértices da face horizontal escolhida.

Por fim, o utilizador deverá definir o comprimento relativo segundo cada um dos eixos X, Y e Z, sendo que 1 corresponde criação de uma caixa com o comprimento igual ao do modelo segundo esse eixo e 0 à inexistência de comprimento.

A janela de definição de parâmetros da caixa de corte deverá ser semelhante à exemplificada na Figura 53.

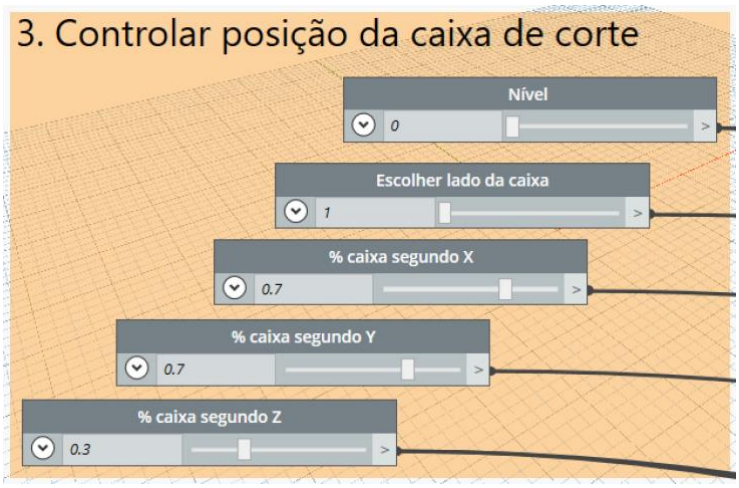


Figura 53 – Parâmetros de dimensionamento de caixa de corte.

2º. - Criação de Caixa de seleção

A partir da geometria da caixa de contorno criada inicialmente, são retiradas as coordenadas dos vértices correspondentes ao ponto mínimo e máximo, *BoundingBox.MinPoint* e *BoundingBox.MaxPoint* respetivamente.

Com a definição das coordenadas dos pontos referidos, são criadas duas listas de pontos relativos aos vértices do topo e da base da *bounding box*, utilizados no ponto anterior para a escolha do ponto de criação da caixa de seleção. Com base nos quatro pontos obtidos para cada uma das faces, é criada uma superfície coincidente com a face da *bounding box* correspondente (Figura 54).

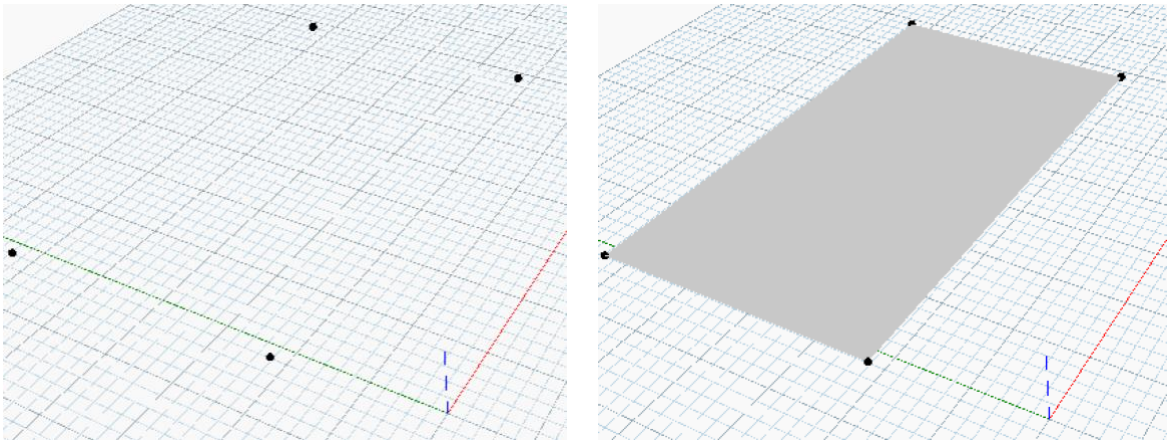


Figura 54 - Pontos e plano criados a partir da *bounding box*.

O método utilizado de criação da caixa utilizado dá a liberdade ao utilizador de escolher o vértice da *bounding box* a partir da qual se inicia a seleção e o comprimento relativo em cada um dos eixos. Deste modo, uma vez definida a superfície correspondente à face superior ou inferior, são calculadas as coordenadas do ponto oposto ao escolhido com base nas dimensões da face definida, com uma distância relativa à mesma sobre os eixos X e Y correspondente aos valores escolhidos pelo utilizador. De modo análogo, é calculada a cota do mesmo segundo eixo Z, resultante da seleção definida (Figura 55).

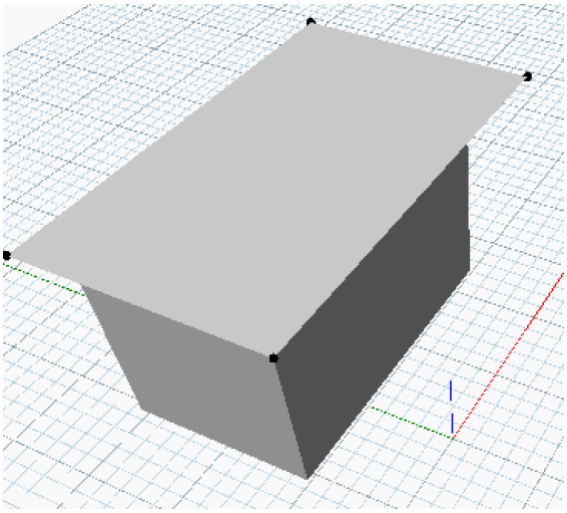


Figura 55 – Exemplo de criação de caixa de seleção para o Nível 1, Lado da caixa 1 e para os comprimentos relativos de 0,7; 0,7 e 0,3 para os eixos X, Y e Z, respetivamente.

Uma vez encontradas as coordenadas segundo os três eixos X, Y e Z, é criada uma nova *bounding box* sólida definida pelos seus pontos mínimo e máximo, que incluem o ponto calculado e o ponto correspondente ao vértice escolhido.

3º. - Intersecção ou Redução de secção do modelo

Após todo o processo de importação do modelo e da criação da caixa de seleção estar finalizado, prossegue-se para as operações de seleção ou de redução de modelo. Na imagem seguinte (Figura 56) é possível verificar a sobreposição da caixa de seleção, representada a azul, no modelo original.

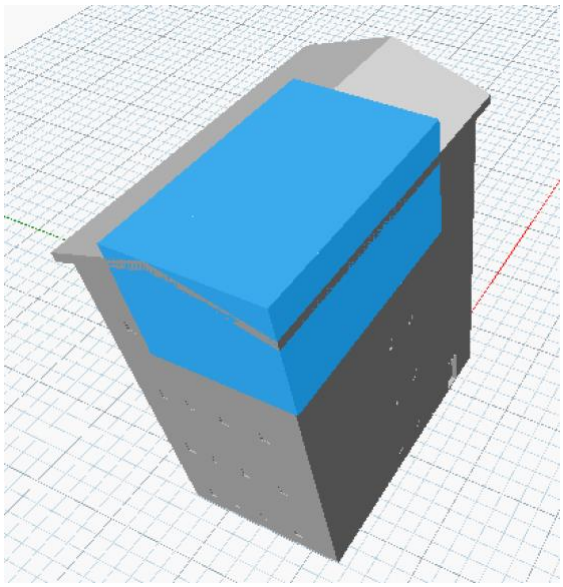


Figura 56 - Sobreposição da caixa de seleção colorida a azul com o modelo original a cinzento.

O primeiro tipo de operação funciona do mesmo modo que divisão por *scope box*. Na base do seu raciocínio está a intersecção de todos os sólidos do modelo com a região que integra a caixa de seleção.

O segundo tipo de operação mencionado retira todo o volume do modelo que esteja no interior da caixa de seleção. No método de redução utilizado na divisão por caixa de seleção, o princípio de

funcionamento parte do modelo completo e resulta num modelo menor, reduzido precisamente pela caixa de corte criada. Na Figura 57 estão representados os dois tipos de operação, resultantes da caixa de seleção exemplificada na Figura 56.

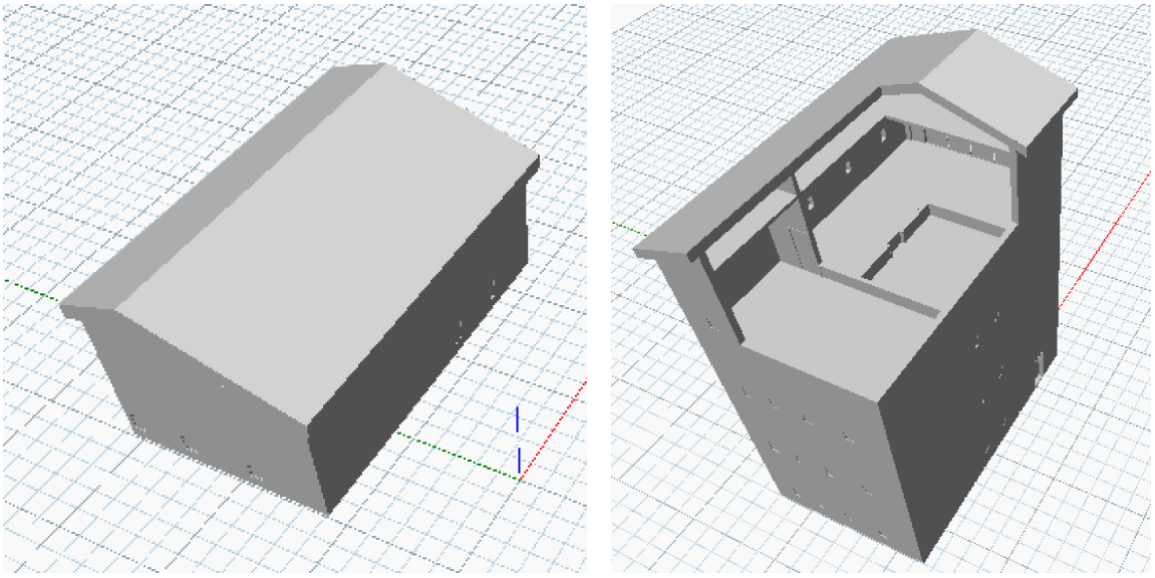


Figura 57 – Representação da seleção e redução de uma secção do modelo através do método de divisão por caixa de seleção, à esquerda e à direita respetivamente.

3.2.3.5. Comparação dos métodos de divisão de modelos para impressão

A escolha de um método de divisão deverá basear-se no tipo de operação a processar e no tipo de modelo e de modelação utilizada no projeto em causa. Os tipos de divisão estudados neste trabalho apresentam várias diferenças no modo como abordam o processo de divisão e no tipo de resultado obtido. Cabe ao utilizador, perante o modelo que dispõe e o resultado pretendido, optar pelo tipo de divisão mais adequado. Na Tabela 4 encontram-se resumidas as vantagens e desvantagens de cada um dos métodos estudados neste trabalho.

Tabela 4 - Vantagem e desvantagens dos métodos de divisão.

Divisão por	Vantagens	Desvantagens
Piso	1. Fragmentação horizontal não geométrica; 2. Inclusão exclusiva de elemento referenciados no piso em questão.	1. Exige modelação cuidada; 2. Apenas permite divisão por piso; 3. Exige referenciação a um piso de todos os elementos. 4. Divisão exclusivamente horizontal.
Grid	1. Marcação precisa dos limites; 2. Secção horizontal do volume de seleção variável; 3. Possibilidade de realizar vários tipos de operações.	1. Manipulação complexa da geometria; 2. Implica definição prévia das regiões limite.
Scope Box	1. Fácil manipulação e alteração da região selecionada; 2. Possibilidade de adição várias regiões de seleção; 3. Possibilidade de realizar vários tipos de operações; 4. Marcação precisa dos limites.	1. Região de seleção limitada a formas quadrilaterais; 2. Implica a definição prévia das regiões limite.
Caixa	1. Marcação iterativa da região de seleção; 2. Gestão simples do volume de seleção; 3. Possibilidade de realizar vários tipos de operações.	1. Marcação das regiões limite com reduzida precisão; 2. Região de seleção limitada a formas quadrilaterais; 3. Colocação da caixa de seleção limitada a um dos vértices da caixa de contorno do modelo.

3.2.4. Adição de Estruturas de Fixação

A divisão de um modelo de um edifício é útil para poder aproveitar as vantagens de visualização que um modelo tridimensional físico permite. A partir da sua divisão é possível observar abertamente os diferentes compartimentos do edifício e assim potenciar ao máximo as virtudes dos processos de fabricação aditiva.

No entanto, a divisão em várias peças de um modelo pode limitar a sua integridade e a sua usabilidade ao se tornar um objeto que facilmente se desintegra, muito por causa da inexistência de forças de ligação entre as diferentes peças impressas. A ausência de ligações que garantam estabilidade de um modelo é uma adversidade à sua divisão direta, sem qualquer preparação do mesmo.

Deste modo, a solução encontrada para este obstáculo passa pela aplicação de pequenas estruturas embutidas em cada divisão do modelo, que permita ligar cada uma das peças entre si. Neste trabalho desenvolveu-se uma metodologia automática de aplicação de estruturas de fixação em edifícios divididos por níveis, no entanto este tipo de solução pode ser aplicado noutros tipos de divisão, tais como os exemplos abordados no ponto anterior.

O modo de aplicação das estruturas pode ser feito de várias formas e com recurso a diferentes tipos de estrutura de fixação. Neste capítulo vai ser abordado a criação de fixadores com forma cilíndrica e de paralelepípedo, do tipo "*Lego*", aplicados de forma automática e manual. No último caso, a sua aplicação de acordo com a localização de elementos à escolha do utilizador, tais como pilares estruturais, paredes, vigas, etc.

3.2.4.1. Criação da estrutura de fixação

O processo de adição de estruturas de ligação entre os diferentes pisos divididos do modelo começa pela criação do tipo de fixador pretendido. Idealmente este tipo de estrutura deve estar devidamente parametrizado para que a alteração das suas dimensões de impressão para impressão seja prontamente alterada.

A parametrização deste tipo de estrutura pode ser feita a partir da criação de uma família no Revit, cujas dimensões estão perfeitamente alinhadas com os parâmetros definidos ou a partir de ferramentas de programação visual, com recurso à criação de sólidos com a forma geométrica idealizada.

3.2.4.1.1. Fixador parametrizado no Revit

O primeiro passo para a criação de um fixador parametrizado no Revit começa pela criação de uma família. De entre todas as opções, a mais indicada passa pela criação de uma família cujo método de introdução no modelo obrigue à seleção de uma face, garantindo deste modo que o fixador se encontra sempre associado a uma superfície sólida.

De seguida, o utilizador deve definir a forma da secção e as respetivas dimensões, certificando-se que cada medida da secção corresponde precisamente à medida de cada um dos parâmetros criados. Na Figura 58 encontra-se representado o processo de dimensionamento da secção horizontal de um fixador quadrilateral. Nela é possível visualizar as dimensões cotadas relativas à largura do fixador, "*Width*". Preferencialmente, a peça deverá ser simétrica para facilitar a sua colocação. Para tal, durante o seu dimensionamento, o utilizador poderá optar por colocar restrições relativas às diferentes medidas. Neste caso, a distância ao eixo central a partir de cada uma das extremidades é forçosamente igual.

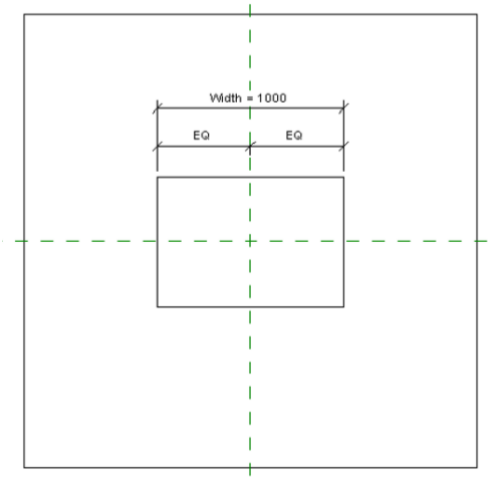


Figura 58 – Dimensionamento da secção horizontal do fixador retangular.

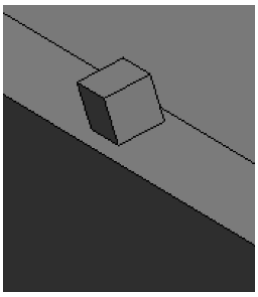


Figura 59 – Fixador redimensionado e colocado, manualmente, num modelo.

Uma vez definida a secção e cada uma das medidas, cria-se o volume correspondente recorrendo a uma extrusão (Figura 59). Idealmente, o formato do fixador deverá corresponder a uma forma simples, sem muitos detalhes nem mudanças de direção, de modo a garantir que este não se opõe ao movimento de colocação e retirada da estrutura principal.

3.2.4.1.2. Fixador parametrizado no Dynamo

Analogamente à parametrização no Revit, o processo de criação da estrutura de fixação com recurso a ferramentas de programação visual engloba três passos. O primeiro, implica a definição dos parâmetros do fixador, tais como a altura, diâmetro ou largura e comprimento. No segundo passo, define-se a secção do fixador. Por fim, a partir da secção do fixador cria-se o sólido correspondente às exigências definidas. Na Figura 60 está demonstrado o processo de criação deste tipo de fixador, com uma operação referente à criação da secção do fixador e a seguinte referente à extrusão do mesmo.

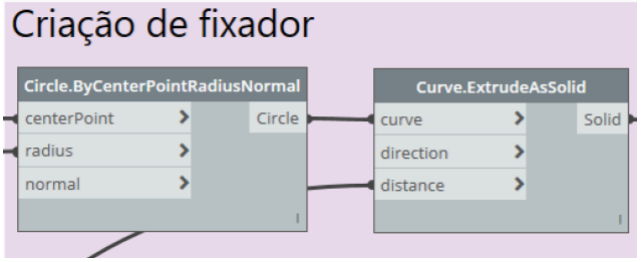


Figura 60 – Excerto de *script* de criação de fixador parametrizado no Dynamo.

3.2.4.2. Colocação das estruturas de fixação

A colocação das estruturas de fixação em cada uma das secções divididas do modelo pode ser um passo algo dificultado pelas características do modelo. No momento da colocação deste tipo de estruturas, o utilizador deverá procurar garantir que para cada sólido adicionado é criada a abertura correspondente no modelo e que os fixadores não apresentam direções contrárias que impeçam a sua utilização. Uma vez que o material de impressão pode não garantir uma rigidez muito elevada, a abertura criada deverá ser sempre um pouco maior que o fixador criado. Deste modo a peça garante a sua estabilidade e ao mesmo tempo reduz as forças de atrito nos movimentos de separação das diferentes peças.

3.2.4.2.1. Introdução manual das estruturas de fixação

A colocação manual dos fixadores permite a sua colocação diretamente no modelo sem adotar nenhum critério. Este tipo de solução pode ser útil em projetos com soluções ou geometrias peculiares que não sejam compatíveis com os padrões dos métodos automáticos ou quando a solução pretendida pelo utilizador é incompatível com os métodos automáticos. Os fixadores a utilizar neste método deverão ser preferencialmente parametrizados no próprio Revit, de acordo com processo abordado anteriormente.

1º. - Adição e dimensionamento das estruturas de fixação

Quer o utilizador opte por utilizar fixadores dimensionados no Revit, quer no Dynamo ou outro método, este deverá começar por importar para o projeto o elemento correspondente ao fixador pretendido.

De seguida o utilizador deverá ajustar as dimensões do fixador que pretende para a impressão. Será importante que neste momento, o utilizador tenha presente os requisitos de impressão da impressora 3D em uso, nomeadamente, quanto à sua resolução de impressão e quanto à espessura de parede mínima de impressão. Quanto menos regular for o formato do fixador, mais dificuldade terá a impressora em reproduzir um formato com uma qualidade aceitável, o que por sua vez poderá resultar numa abertura de fixador não compatível com o próprio fixador. Não menos importante deverá ser a atenção dada para a espessura mínima de impressão. Uma espessura de um elemento inferior à espessura mínima de impressão poderá resultar num elemento não impresso e que poderá inviabilizar todo o processo.

Na imagem representada na Figura 61 estão assinalados os diferentes parâmetros associados ao fixador exemplificado nas figuras anteriores. Ao criar os parâmetros associados a cada dimensão, o utilizador pode modificar as suas dimensões a qualquer altura, mudando as dimensões para diferentes projetos ou impressões.

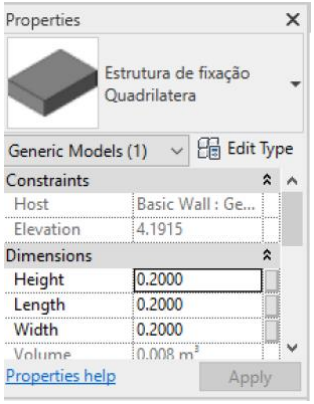


Figura 61 – Janela de propriedades de um fixador parametrizado no Revit.

2º. - Colocação e criação de aberturas

Uma vez selecionados e ajustados os fixadores para o projeto e para a impressão em causa, o passo seguinte é o da colocação dos mesmos no modelo dividido.

O processo de colocação de cada um dos elementos de fixação pode ser executado tal como qualquer outro elemento num *software* BIM. No entanto o utilizador deverá assegurar-se que coloca cada fixador num ponto estratégico, devidamente suportado pelo modelo e que não crie espaços de difícil impressão.

Após a colocação de todos os fixadores pretendidos, todos os elementos respetivos presentes no projeto deverão ser unidos aos elementos sob os quais irão ficar posicionados após a impressão. Deste modo, ao estabelecer uma ligação de união, o Revit irá criar automaticamente a abertura necessária para cada fixador, tal como se pode verificar na Figura 62. Este tipo de colocação totalmente manual, apesar de ser mais expedito, não permite gerir a escala da abertura. Consequentemente, recorrendo a este processo, o volume das aberturas será sempre igual ao do fixador.

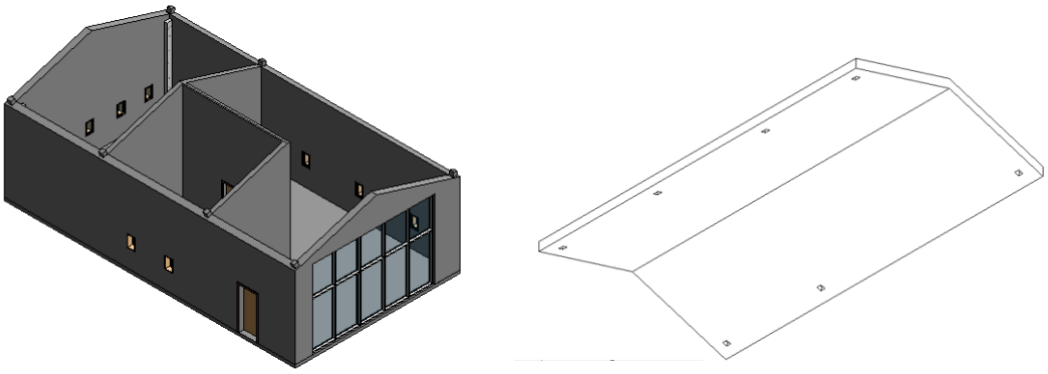


Figura 62 - Exemplo de modelo dividido por piso com adição totalmente manual de fixadores.

A partir da utilização de um *script* de programação visual é possível gerir o volume das aberturas e colocá-las sobre a secção dividida. Para tal é necessário importar os elementos correspondentes aos fixadores, selecionar a sua geometria e o seu ponto central. Através de uma operação de redimensionamento e selecionando a relação entre a abertura e o fixador correspondente é possível gerar um volume maior ou igual em relação a ponto mencionado.

Na imagem que se segue (Figura 63) está demonstrado um segmento do *script* que define a operação mencionada. Importada a família do fixador e gerada a correspondente geometria, o Dynamo calcula o centro geométrico de cada um dos elementos. Em simultâneo, é listado o vetor normal à face sobre a qual está orientado cada um dos fixadores. Recorrendo a uma operação de redimensionamento a partir da sua geometria, do seu ponto base e do rácio pretendido para cada um dos eixos, é então transformado o volume correspondente à abertura. Após a sua criação, o volume mencionado deverá ser removido da respetiva secção do modelo e por fim, todo o modelo resultante deverá ser submetido ao procedimento de união referido no início do capítulo. O *script* completo pode ser consultado no Anexo A.

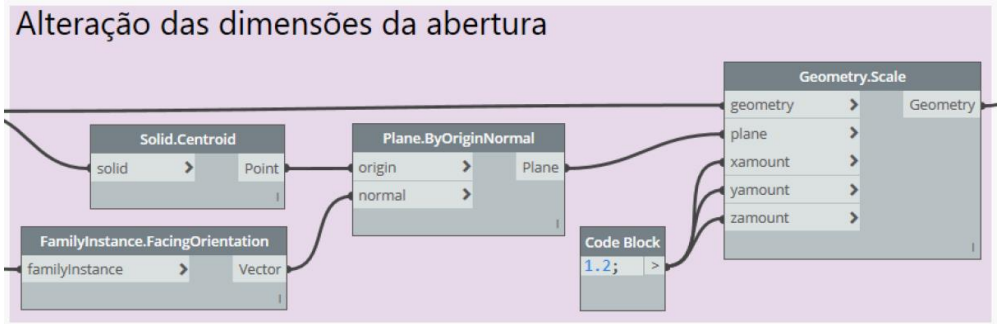


Figura 63 - Excerto do *script* de colocação manual dos fixadores.

3.2.4.2.2. Introdução automática de estruturas de fixação

A colocação de fixadores deverá ser idealmente programada de modo automático. Devido à quantidade de repetições que o processo implica, a colocação manual poderá levar a um maior número de erros de colocação e a um maior tempo de execução da tarefa de modo global. Deste modo a criação de um método de colocação de fixadores de forma automática poderá facilitar a conceção de modelos divididos com fixadores. No entanto a unicidade de cada projeto e de cada edifício modelado, aliado aos diferentes métodos de modelação utilizados pelos diferentes utilizadores representam uma barreira na criação de um parâmetro que funcione em todos os casos. No âmbito deste trabalho foi programado um método de colocação automática de fixadores em modelos divididos na horizontal, por nível.

O princípio de funcionamento deste método tem por base a presença de elementos que se repitam nos diferentes pisos e que estejam presentes nas zonas limite da divisão como referência para o posicionamento das estruturas de fixação. Um elemento que cumpre os requisitos é o pilar estrutural, no entanto existem outros que podem ter um processo idêntico, como é o caso das paredes interiores e exteriores. No processo que se segue, o método é exemplificado somente com recurso aos pilares estruturais.

Uma vez referido o elemento base de utilização, o método de funcionamento do processo baseia-se na colocação do elemento correspondente ao fixador no topo dos pilares do nível em execução, ao mesmo tempo em que é retirado o volume correspondente ao fixador a utilizar no modelo do nível imediatamente inferior.

1º. - Criação de lista de níveis

A primeira etapa no processo de colocação de fixadores (exemplificada na Figura 64) implica a criação de duas listas de elementos, uma correspondente aos elementos no nível superior da divisão e a outra correspondente ao nível inferior da divisão.

O processo inicia-se com a importação de todos os elementos correspondentes a todos os níveis dimensionados no projeto, devidamente listados por ordem de elevação. A seleção poderá, também, ser feita manualmente, mediante a alteração do *script.*

Com recurso à utilização de um "*Number Slider*", útil para a introdução de dados, é definido o índice correspondente ao nível superior da divisão. A este nível, mediante uma operação de subtração é referenciado o nível inferior da divisão. Deste modo obtém-se uma lista com o limite superior e inferior da divisão.

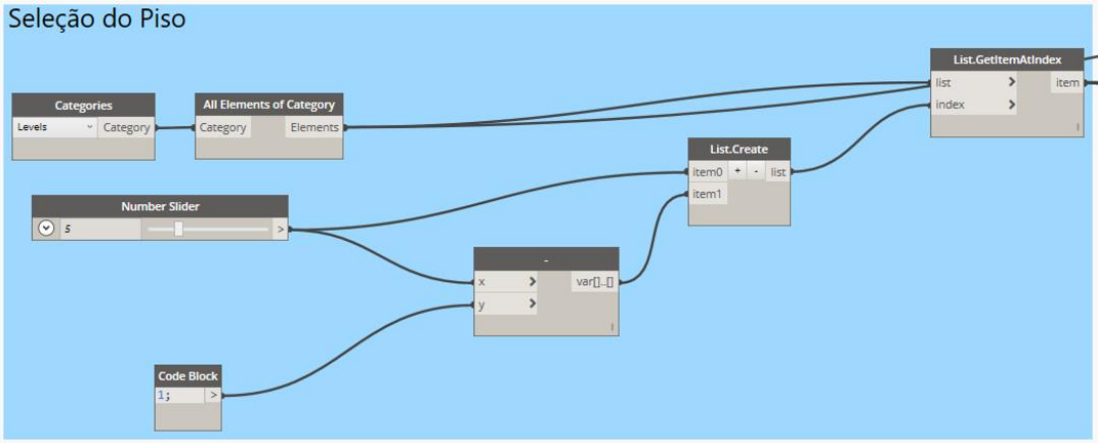


Figura 64 - Excerto do *Script* de colocação automática de fixadores.

A partir da lista criada, o processo desenvolve-se separadamente. Uma parte dedicada ao processo de divisão e a outra dedicada à colocação das estruturas de fixação e das respetivas aberturas. É importante referir, que este *script* é compatível com a utilização de modelos previamente divididos ou sem necessidade de referenciação dos níveis. Nesses casos apenas, o *script* apenas atuará sobre a colocação dos fixadores/aberturas.

2º. - Determinação de pontos de colocação dos fixadores e aberturas

Através da ferramenta "*AllElementsOfCategoryAtLevel*" (Figura 65), são listados todos os elementos que servirão de base para a colocação dos fixadores e das respetivas aberturas. Para tal é selecionada a categoria correspondente ao elemento selecionado e aos níveis pretendidos, contidos na lista previamente criada.

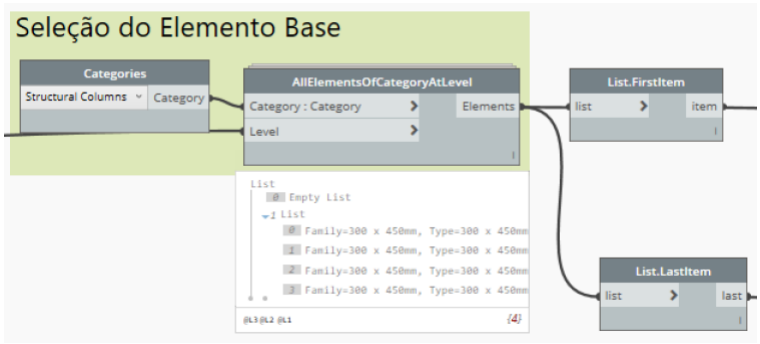


Figura 65 - Excerto do *Script* de colocação automática dos fixadores.

De seguida, o processo desenrola-se separadamente para a criação dos fixadores e dos vazios correspondentes. Numa primeira fase, ambos os processos são semelhantes. A partir da divisão da lista criada com os elementos de cada um dos pisos, é retirada a informação geométrica de cada um dos elementos contidos na lista.

Uma vez obtida a lista com a geometria dos elementos base selecionados, os elementos sólidos são desintegrados e transformados numa "*PolySurface*", correspondente à superfície constituída pela totalidade das faces do elemento. A partir da *PolySurface*, o objeto é novamente desintegrado e dividido pela totalidade das suas faces, que passam a comportar-se como elementos independentes.

Após dividir o elemento em causa por faces, prossegue-se à seleção da sua face superior (Figura 66). A seleção desta é face é essencial uma vez que vai servir de referência para a colocação dos fixadores ou das aberturas.

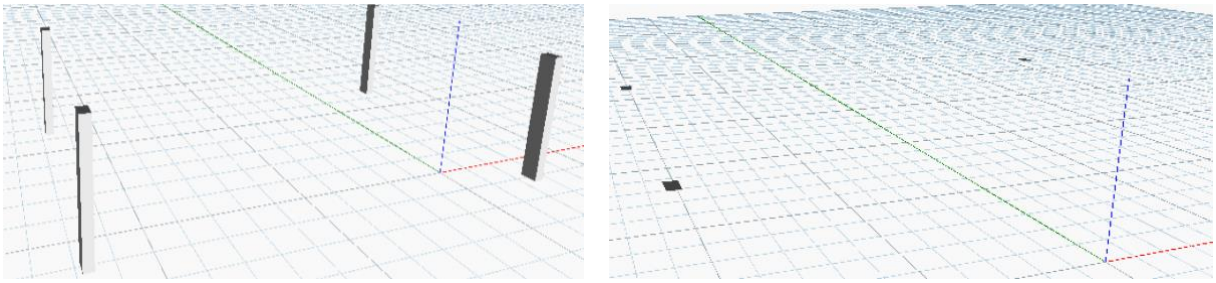


Figura 66 – Vista 3D das *PolySurfaces* (à esquerda) e das faces superiores (à direita) dos pilares estruturais e um modelo BIM.

Deste modo, depois de devidamente selecionada a face superior, é calculado o respetivo centro geométrico. Após este passo, o Dynamo deverá fornecer uma lista com as coordenadas de todos os pontos centrais das faces superiores dos pilares presentes no piso do modelo. Os pontos deverão estar distribuídos de modo semelhante ao representado na imagem da Figura 67.

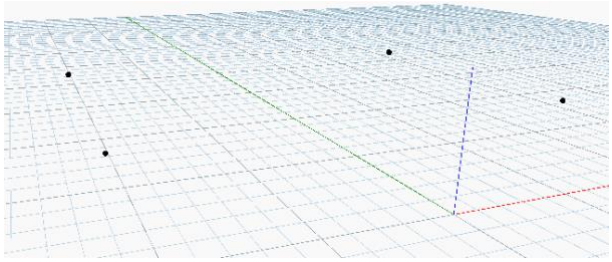


Figura 67 – Pontos de referência para a colocação dos fixadores e aberturas.

3º. - Colocação dos fixadores/aberturas

Depois de determinada de modo automático a localização de cada ponto de colocação dos fixadores, o processo passa pela colocação dos mesmos. Caso se pretenda colocar um tipo de fixador parametrizado no Revit, bastará proceder à sua importação, centrada de acordo com os pontos calculados. No caso de seguir o processo com fixadores parametrizados no Dynamo, o processo é semelhante, bastando adicionar o *script* de criação dos fixadores e adicioná-los sobre os pontos referidos.

Tal como é possível visualizar na Figura 68, o processo de adição dos fixadores parametrizados no Dynamo desenvolve-se a partir da criação da secção horizontal do fixador, com base na dimensão relativa ao raio da circunferência definido pelo utilizador. A secção é então extrudida novamente com a dimensão relativa à altura definida pelo utilizador, dando assim origem a um fixador colocado precisamente sobre o centro das faces obtidas anteriormente. O dimensionamento do fixador tanto pode ser configurado para um ajuste manual, como para uma adaptação automática às dimensões do elemento base.

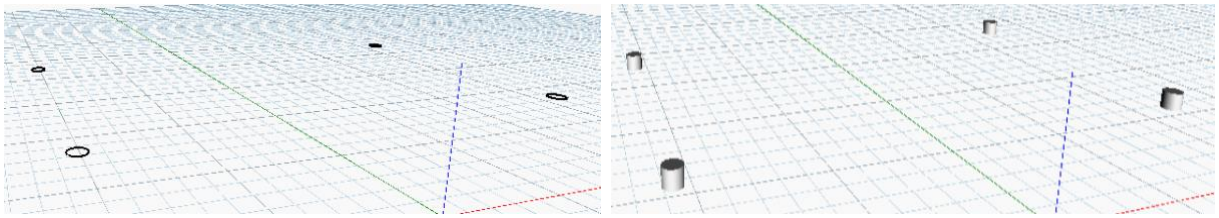


Figura 68 – Processo de adição/criação dos fixadores sobre os pontos referenciados.

O processo finaliza-se com a adição dos fixadores ao topo do modelo dividido e pela subtração, se necessário, do volume correspondente às aberturas na base do mesmo (Figura 69). A principal diferença no dimensionamento das aberturas e dos fixadores está no redimensionamento que é aplicado sobre os volumes das aberturas. Uma vez adicionados os fixadores, é possibilitado o redimensionamento de qualquer uma das dimensões para fazer face ao possível desgaste das peças impressas após uma utilização contínua. No entanto, caso o utilizador não pretenda, esta opção pode ser removida.

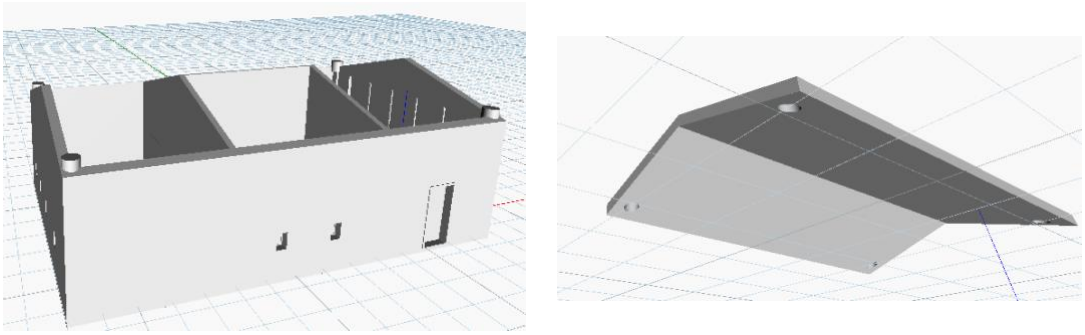


Figura 69 – Exemplo de modelo com adição de fixadores e de aberturas, respetivamente.

O *script* desenvolvido neste capítulo encontra-se configurado para colocar automaticamente os fixadores sobre o modelo dividido e em simultâneo criar as aberturas relativas ao piso inferior. No entanto também está desenvolvido para atuar sobre dois casos especiais, o do primeiro nível, que não apresenta nenhum piso abaixo e o do último nível.

No caso do primeiro nível, não existindo qualquer nível abaixo do mesmo não há a necessidade de criar aberturas para os fixadores. Deste modo criou-se uma verificação, que ao detetar a inexistência de um piso inferior ao da divisão impede o desenvolvimento de aberturas.

O modo de funcionamento da verificação, que pode ser observada na Figura 70, baseia-se na verificação a partir da função "*List.ContainsNull*" da existência de elementos nulos na lista com os níveis selecionados para a colocação de fixadores e das respetivas aberturas. Caso na lista que apresenta o nível selecionado exista algum elemento nulo, o processo de criação de aberturas resultará também ele num sólido nulo e, portanto, inexistente. Este tipo de verificação poderá ser falível no caso de se utilizar um piso superior ao último, devendo o utilizador estar atento a essa situação.

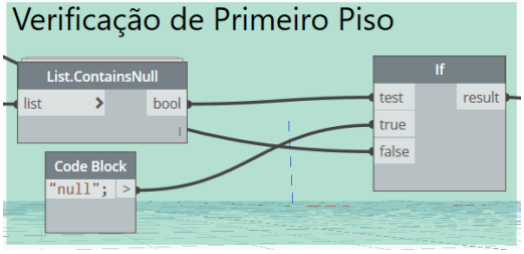


Figura 70 – Verificação de divisão no primeiro nível.

O segundo caso especial efetua a verificação da seleção do último piso do modelo, cuja utilização de fixadores não só é dispensável como contraproducente. Para tal, é verificado o número de identificação associado ao último piso do projeto e ao piso mais elevado da lista de pisos selecionados (Figura 71). Caso os números de identificação sejam correspondentes, é dada a indicação ao *script* para considerar nulo o restante processo. No caso de os números não corresponderem, o processo continua tal como se tratasse de um piso comum.

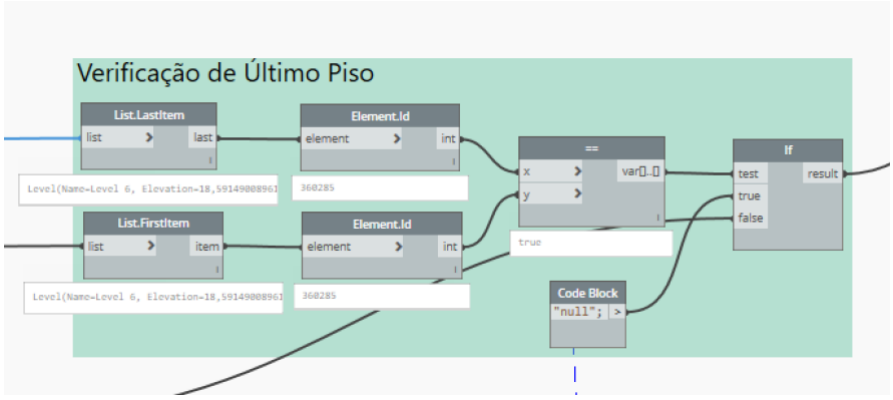


Figura 71 – Verificação de divisão no último nível.

3.2.5. Impressão a cores

A utilização de cor nas impressões tridimensionais adiciona um critério importante, que pode ser útil em vários aspetos, como representação, identificação de diferentes projetos, referenciar elementos, entre outros. Para o âmbito deste trabalho apenas se aborda dois tipos de impressões a cores, que diferem totalmente no seu processo de preparação e no resultado final.

O tipo de impressão a cores mais simples trata-se da impressão multi-cor ou multi-material. Este tipo de impressão consiste na utilização de vários materiais, cada um com uma cor diferente correspondente. Apesar de não ser um método transversal a todos os tipos de tecnologias, está presente nas impressoras FDM, bastante comuns no mercado de impressoras 3D.

O outro tipo de impressão, já mencionado no capítulo de apresentação das diferentes tecnologias, denominado de "*full-color*" apresenta um método de colorização livre da superfície exterior do modelo impresso. Ao contrário da impressão multi-cor, o padrão de colorização não está obrigatoriamente associado a materiais diferentes e apresenta uma distribuição de cores de acordo com as preferências do utilizador, sem as restrições físicas da impressão multi-cor.

3.2.5.1. Multi-cor / Multi-Material

Tal como referido acima, a impressão multi-cor associa materiais diferentes a diferentes cores. Esta mudança de material pode alterar apenas as propriedades representativas do material, ou também as restantes propriedades físicas. Como tal, o processo deste tipo de impressão implica a exportação do modelo, devidamente separado por partes, respetivas a cada cor.

3.2.5.1.1. Processo de preparação de impressão multi-cor manual

A impressão multi-cor com o processo de impressão manual apenas abrange um número limitado de opções. Este tipo de impressão recorre à mudança de material durante o processo de impressão, podendo apenas alterar a cor entre camadas, ou seja, nos planos horizontais de impressão.

Ao contrário dos restantes métodos de impressão multi-cor, este método não exige a separação do modelo, podendo por isso ser executado numa grande variedade de impressoras que apenas suportem um material de impressão, tais como as impressoras *FDM* com apenas um extrusor.

Deste modo, a impressão multi-cor com um processo manual, exige que o utilizador acompanhe todo o processo de impressão de modo a proceder à alteração do material de impressão no momento correto.

Devido à simplicidade e às limitações do processo, o padrão de mudança de cor ao longo do objeto é muito limitado, resultando em objetos semelhantes ao representado na Figura 72 .

Figura 72 - Exemplo de objeto impresso manualmente a cores [99].

3.2.5.1.2. Processo de preparação de impressão multi-cor automática

O processo automático de impressão multi-cor permite que o utilizador não tenha de intervir ao longo de todo o processo de impressão. Como tal, a impressora deverá ter todas as indicações de alternar cores e/ou materiais ao longo da impressão. O método de preparação de impressão multi-cor de forma automática implica a divisão do modelo em submodelos, em que cada divisão corresponde a uma cor diferente.

De modo a agilizar todo o processo de exportação em diferentes ficheiros, foi desenvolvido um processo de seleção das cores a integrar na impressão.

1º. - Criação de parâmetro associado a cada cor

O primeiro passo para a automatização da divisão do modelo por cores trata-se da criação de um parâmetro de seleção associado a cada uma das cores a utilizar (Figura 73). Uma vez que cada material diferente corresponde a uma cor diferente, o número de cores a utilizar no projeto nunca irá passar da dezena de cores, sendo o mais comum apenas utilizar cerca de duas cores. Como tal, o número de parâmetros criados deverá corresponder ao número de cores a utilizar na impressão.

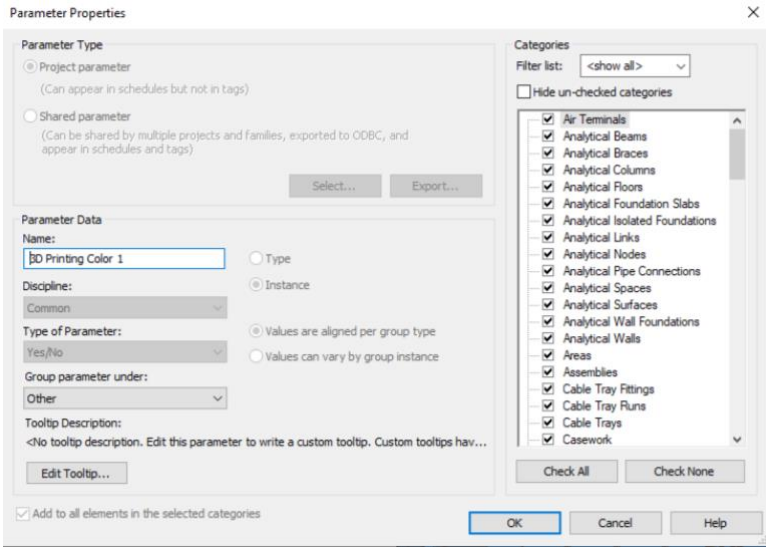


Figura 73 – Janela de criação de parâmetro no Revit.

À semelhança do procedimento utilizado na criação do parâmetro "*3D Printing*", recorre-se à criação de parâmetros do tipo *Yes*/*No* para cada cor com o objetivo de agregar os elementos por cor de impressão. Não é importante neste passo definir no Revit a cor a utilizar, uma vez que o modelo será exportado no formato STL e perderá toda a informação referente à sua cor. É estritamente necessário assegurar que todos os elementos a imprimir na mesma cor estão devidamente selecionados para o mesmo parâmetro. Apenas no *software* de preparação para a impressão é que o utilizador poderá definir a cor associada a cada parte do modelo dividido.

2º. - Criação de filtro de cor

Uma vez criado o parâmetro para cada uma das cores, basta associar um filtro de visualização que verifique todos os elementos associados a essa mesma cor (Figura 74). Neste passo o utilizador poderá associar uma cor a cada um dos filtros ou optar por ocultá-los da visualização (Figura 75). É essencial que o primeiro filtro presente seja o dos elementos a não incluir na impressão. Após filtrar os elementos por cada cor, é importante que estes sejam submetidos, individualmente, ao processo de união das massas e porventura à adição de estruturas de fixação antes de serem exportados.

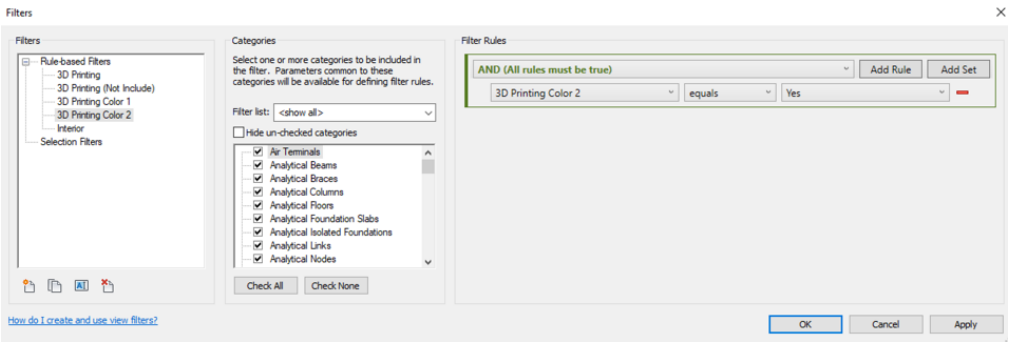


Figura 74 – Janela de criação de filtros de visualização.

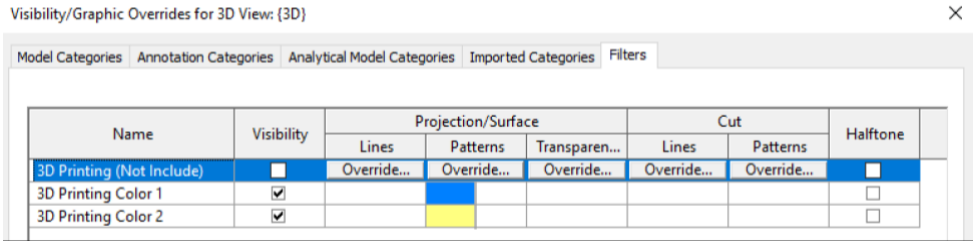


Figura 75 – Janela de gestão dos filtros de visualização.

Após a seleção dos filtros, o resultado deverá ser semelhante ao da imagem da Figura 76.

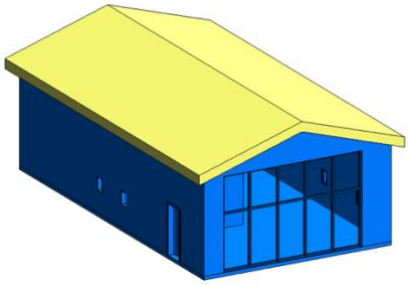


Figura 76 - Exemplo de modelo para impressão multi-cor automática.

3º. - Exportação do modelo

Uma vez concluído todo o processo de filtragem, o utilizador deverá proceder à exportação de cada um dos conjuntos de elementos correspondentes a cada uma das cores. Após concluída a exportação do modelo no Revit, o utilizador apenas terá de associar cada ficheiro a cada material de impressão no *software* de preparação de impressão. Na Figura 77, encontra-se visível o mesmo modelo exemplificado na imagem anterior, pronto para a impressão com cada uma das cores associada ao material correspondente, a partir do programa *Ultimaker Cura*.

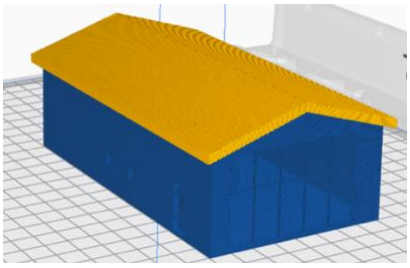


Figura 77 – Exemplo de modelo preparado para impressão multi-cor.

3.2.5.2. *Full-color*

Apesar de se tratar de uma tecnologia mais evoluída no seu processo de impressão, a preparação de um modelo para a utilização de cor do tipo *full-color* é mais simples do que a impressão a cores do tipo multicor. A preparação de todos os tipos de projetos até aqui abordados estão pensados para serem exportados no formato *standard* de impressão 3D, STL binário, ou STL ASCII. No entanto, este tipo de formato é puramente geométrico e não armazena informação relativa a cor ou textura. Logo, a preparação de um objeto para impressão *full-color* implica a exportação noutro tipo de formato, tal como "OBJ", "VRML" ou "X3D".

Uma vez exportado por qualquer um dos tipos de formatos mencionados, o modelo 3D *full-color* irá utilizar a cor que o Revit atribui a cada um dos materiais correspondentes a cada um dos elementos. Estas cores podem ser alteradas no próprio Revit ou num qualquer programa de manipulação de geometrias 3D. Ainda assim é preciso ter em conta que uma vez que os modelos são processados por qualquer um dos *scripts* mencionados até este momento, estes deixam de se comportar como o elemento original, tanto no que diz respeito ao material respetivo como nos seus limites. Portanto, nos casos em que se recorrer à utilização de qualquer um dos *scripts* a colorização do objeto deverá ser processado posteriormente à sua exportação no Revit, de modo a garantir a integridade da peça.

Na imagem que se segue (Figura 78), é possível ver um modelo exportado no formato do OBJ diretamente a partir de um *Add-In* do Revit, e posteriormente tratado num *software* de manipulação de geometrias, denominado de Blender. Neste caso, os dois *softwares* complementaram-se mas noutros casos poderá ser necessário apenas recorrer à exportação direta do Revit.

Figura 78 - Exemplo de modelo 3D com colorização *full-color*.

3.2.6. Exportação do modelo

Tal como referido ao longo deste trabalho, a exportação *standard* de modelos 3D para impressão recorre ao formato STL, podendo optar-se por um dos sub-formatos, Binário ou ASCII. A exportação para este tipo de formato em *softwares* BIM nem sempre corresponde a uma funcionalidade nativa.

No Revit, mediante a instalação de um *Add-In* é possibilitada a exportação sob os dois tipos de formatos mencionados. É ainda fornecido ao utilizador a possibilidade de escolher a escala de exportação, no que às unidades diz respeito e a escolha das categorias a integrar a impressão (Figura 79).

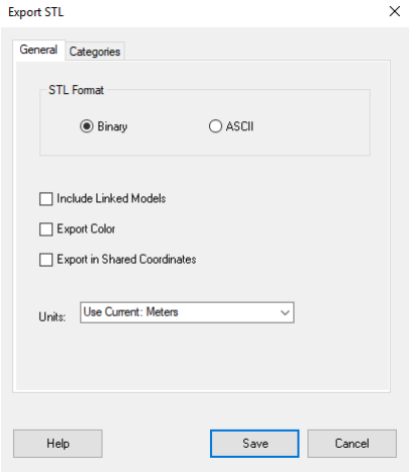


Figura 79 - Janela de exportação STL no Revit.

3.3. PREPARAÇÃO DA IMPRESSÃO

A partir do momento em que o edifício modelado e preparado no *software* BIM é exportado sobre a forma de qualquer um dos formatos mencionados, o seu processamento é exatamente igual ao utilizado para impressão de qualquer outro tipo de objeto. A preparação da impressão deverá transformar o modelo exportado num modelo adaptado às especificações de cada impressora e pronto para imprimir.

Este passo do processo de impressão pode ser feito em vários programas, vários dos quais gratuitos. No âmbito desta tese irá ser utilizado o *software* (*open source*) Ultimaker Cura 4.0.0., apresentado anteriormente. Este encontra-se preparado para processar modelos para impressoras FDM e SLA.

3.3.1. DEFINIÇÃO DA ESCALA E DA ORIENTAÇÃO DO MODELO

A primeira etapa na preparação do modelo após a sua exportação passa pela sua acomodação no volume de impressão e do ajuste das suas dimensões. Nesta parte da preparação, o utilizador tem a liberdade de alterar as dimensões sobre qualquer um dos eixos X, Y e Z e de escolher a orientação que minimiza o tempo de impressão e a necessidade de estruturas de suporte.

Embora alguns *softwares* permitam a escolha de uma orientação de modo automático, no Cura, esta escolha é manual. Por defeito, a orientação dada a cada objeto é a mesma utilizada na sua modelação. A escolha adequada da orientação poderá implicar a poupança de uma grande quantidade de material e de tempo de impressão. Na imagem da Figura 80, está demonstrada a impressão de uma simples mesa, com a sua orientação base (à esquerda) e com a orientação que minimiza a utilização de estruturas de suporte (à direita). Da primeira solução para a segunda, para as dimensões de 76.2 x 76.2 x 45.7 mm verificou-se um decréscimo do tempo de impressão de 5 horas e 51 minutos para 2 horas e 38 minutos, e de uma quantidade de material de 81g para 37g.

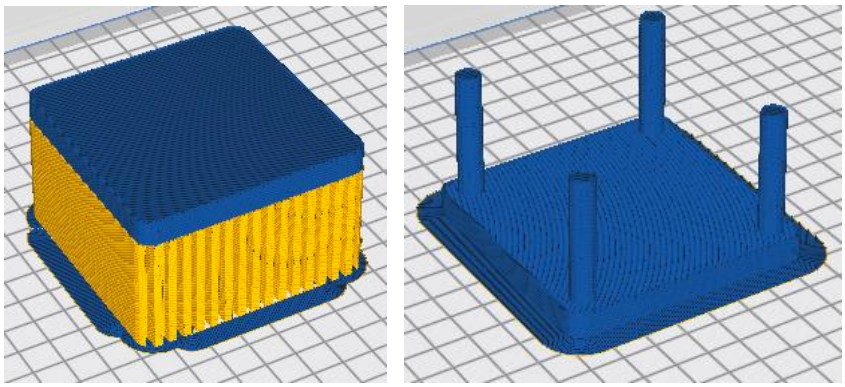


Figura 80 - Exemplo de impressão com a orientação base e com a orientação otimizada

3.3.2. DEFINIÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES DA IMPRESSÃO

Na segunda etapa da preparação da impressão, o utilizador deverá escolher a espessura de cada camada de impressão, a espessura de parede, a percentagem e geometria do preenchimento interior, entre outros. Dependendo do *software* utilizado, as configurações poderão variar e permitir alterar o próprio modelo para se adaptar às configurações impostas.

O primeiro passo implica a definição da espessura a utilizar na impressão. Em alguns tipos de impressão esta poderá ser variável, noutros terá de ser escolhido um valor. Quanto maior for a espessura de cada camada, menos camadas terá a impressão e menos tempo levará a concluir o processo. No entanto, a escolha de uma espessura muito elevada poderá ter resultados negativos na definição do modelo segundo

o eixo Z. Caso o utilizador pretenda uma impressão de qualidade elevada, deverá optar por uma espessura tão fina quanto possível.

O segundo passo, obriga à escolha da percentagem de preenchimento interior do modelo e da geometria a utilizar. À semelhança do que acontece na espessura de camada, esta poderá ser variável, no entanto, esta opção não está disponível para todas as impressoras. A utilização de um preenchimento mais completo irá conferir uma maior estabilidade do modelo mas em contrapartida obriga à utilização de mais material de impressão. Utilizar um preenchimento gradual, irá permitir atribuir um preenchimento mais completo apenas quando necessário.

Após definido o preenchimento interior e a espessura de camada, o utilizador poderá definir a espessura de parede a utilizar em qualquer uma das orientações. Existe também a possibilidade de aplicar uma expansão horizontal do modelo na região sólida. Esta ferramenta atua somente na porção sólida do modelo.

Por fim, poderão ser definidos outros aspetos tais como a criação de uma base de auxílio à impressão e definidos os comportamentos do material em uso, como a sua retração, temperatura de impressão, entre outros.

3.3.3. Geração de Suportes

Dependente do tipo de impressão, a utilização de suportes poderá variar. Nos tipos de impressão destinados ao uso com Cura, todos os elementos do objeto a imprimir que não cumpram o ângulo definido pelo utilizador são suportados por uma geometria de suporte adicionada automaticamente. Na Figura 35 e na Figura 80 é possível observar a geometria utilizada nas estruturas de suporte geradas automaticamente. Noutros *softwares* de preparação de impressão é possibilitado ao utilizador a manipulação manual do mesmo.

3.3.4. Corte do Modelo em Camadas

Por fim, no último passo, automaticamente a partir das definições utilizadas nos passos anteriores o modelo é dividido em camadas e seu percurso de impressão é traçado. A partir deste ponto, o objeto está preparado para ser exportado para a impressora num ficheiro G-code e ser impresso. Antes da sua exportação, será ainda possível visualizar no *software* utilizado uma pré-visualização do modelo de impressão, o que permitirá evitar a impressão de modelos com erros na sua geometria. É essencial uma verificação cuidada de toda a geometria antes que o processo de impressão se inicie.

3.4. Pós-processamento

A última etapa da impressão 3D de um modelo, consoante o tipo de impressão trata-se do pós-processamento, onde o modelo é finalizado após a impressão propriamente dita. Este passo varia de impressora para impressora e de tecnologia para tecnologia. A escolha do tipo de impressão deverá ter em conta os processos de cura necessários, uma vez que podem aumentar significativamente a duração de todo o *workflow* e alterar as características da superfície do objeto. Na generalidade das tecnologias de impressão o pós-processamento resume-se à remoção das estruturas de suporte e ao tratamento da superfície.

A título de exemplo, para as impressões realizadas pela tecnologia FDM, alguns dos tratamentos poderão passar pela utilização utensílios básicos, pontiagudos de preferência. Para o tratamento da superfície

também poderá recorrer-se a materiais de polimento para suavizar a superfície. Relativamente às impressoras SLA, para a remoção dos suportes o processo será semelhante, conforme a resistência do material utilizado. Poderá ainda ser útil aplicar um *spray* de proteção UV. É importante referir, que cada impressora e cada tecnologia implicam tratamentos distintos, e que deverão ser estudados antes da impressão.

4
CASO DE ESTUDO

4.1. INTRODUÇÃO

O caso de estudo visa colocar em prática os métodos de preparação de modelos para impressão 3D estudados no capítulo anterior. A existência de um número muito variado de tipos de modelos BIM, aplicados a diferentes especialidades e com diferentes propósitos, dificulta a criação de ferramentas uniformes de preparação. No entanto, para além dos vários automatismos criados referiu-se também a possibilidade de preparar modelos manualmente. Esta hipótese vem alargar a quantidade de cenários diferentes de preparação. Nesse sentido, neste capítulo propôs-se o estudo de dois projetos tipologicamente diferentes, sendo que no primeiro se apresenta um caso representativo de um projeto de um edifício multifamiliar considerado comum e no segundo, um projeto de uma obra especializada, de um tubo de ventilação construído no âmbito de uma obra numa linha de metropolitano.

Com isto, pretende-se recorrer o mais possível aos métodos automáticos concebidos, tendo sempre presente os métodos manuais como solução alternativa. Assim será possível testar as várias etapas do processo de impressão 3D de modelos BIM e consequentemente retirar conclusões quanto à sua aplicabilidade, requisitos, prazos e custos. Por questões económicas e de prazos optou-se por apenas executar a impressão do caso de estudo nº2.

4.2. CASO DE ESTUDO 1: EDIFÍCIO DE HABITAÇÃO

4.2.1. APRESENTAÇÃO DO PROJETO

O primeiro caso de estudo trata-se de um modelo de um edifício predial de habitação multifamiliar. A infraestrutura em estudo apresenta 10 pisos, com uma altura de 45 metros. Tal como referido, o edifício está projetado para habitação, sendo formado por um piso-tipo que se repete ao longo de 10 pisos, diferindo na cobertura e no R/Chão. No nível inferior à cota da estrada está projetado um parque de estacionamento. Na Figura 81, está representada uma vista 3D do projeto em causa, no programa Revit.

Figura 81 – Vista 3D do projeto do edíficio do caso de estudo nº1.

4.2.2. OBJETIVOS

Para este projeto é pretendida a preparação para impressão de um modelo maciço completo do edifício com uma divisão transversal num qualquer dos pisos-tipo, devidamente dotada dos encaixes necessários. Para tal, a preparação do modelo deverá pôr em prática várias das metodologias e *scripts* desenvolvidos anteriormente, tais como o de verificação dimensional, de massificação do modelo, de divisão por *scope box*, de adição automática de fixadores e por fim, de união do modelo.

Pretende-se também perceber quais os requisitos técnicos que uma impressão deste tipo requer, qual o nível de detalhe possível e o consequente custo e período de impressão estimados.

4.2.3. DESENVOLVIMENTO

4.2.3.1. Pré-processamento

4.2.3.1.1. Preparação do Modelo

O processo de impressão 3D do modelo do edifício em estudo inicia-se pela preparação do projeto pré-modelado. Para tal, este terá de passar por várias das etapas estudadas nesta dissertação. Os diversos elementos do modelo deverão ser verificados quanto à sua dimensão e consequentemente selecionados para o modelo a imprimir. De seguida o modelo deverá ser alterado de modo a apresentar-se totalmente preenchido no seu interior. Por fim, este deverá ser dividido e complementado com os encaixes que garantam a estabilidade do modelo na secção de divisão.

O processo inicia-se pela verificação dimensional. Antes de poder correr o *script* de verificação dimensional é necessário criar os parâmetros relativos às dimensões e volume de cada elemento, "Printability (Dimensions)" e "Printability (Volume)", respetivamente.

Uma vez adicionados com sucesso os parâmetros, procede-se à verificação propriamente dita. Neste passo são definidas as características da impressão, tais como a escala, espessura mínima e volume mínimo. Para permitir uma visualização detalhada do interior do edifício e ao mesmo tempo não tornar o modelo numa maquete de elevadas dimensões, considerou-se a escala de 1/200. Quanto às especificações da impressão, uma vez que não se está a preparar um modelo para uma impressora cujos requisitos sejam conhecidos à partida, utilizaram-se valores atribuídos com base num detalhe pretendido para o modelo, sem qualquer referência especifica. Para a espessura mínima utilizou-se, o valor de 0,25 mm e para o volume o valor de 2,5 mm^3, resultante de um volume correspondente à espessura mínima

especificada, multiplicada por uma unidade nas restantes direções. Na imagem que se segue (Figura 82) estão demonstrados alguns dos resultados obtidos nesta fase da preparação.

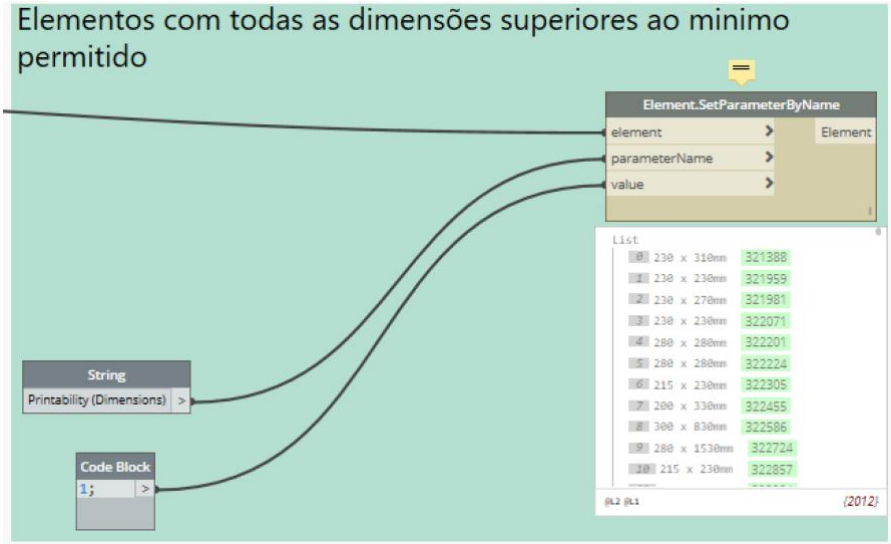


Figura 82 – Exemplo de elementos aprovados segundo as suas dimensões.

Após correr o *script* de verificação dimensional, foi possível gerar e aplicar automaticamente os resultados para cada elemento. Neste caso de estudo, o número de elementos reprovados representou uma elevada percentagem do total de elementos constituintes do modelo (240 reprovaram na verificação das dimensões e 373 reprovaram na verificação do volume, num total de 2252 elementos). No entanto, grande parte dos elementos não aprovados representava um papel importante para o modelo impresso e apresentava-se colocado sobre outros elementos que poderiam habilitar a sua impressão sem obstáculos. Destes elementos (Figura 83) são exemplos alguns tipos de vãos envidraçados, portas, *courettes* e os guarda-corpos. Assim, apesar de apresentarem características suscetíveis de criar problemas de impressão, numa primeira fase estes elementos não foram excluídos e mantiveram-se para os passos futuros, sempre com a possibilidade de reverter a opção no caso de se realmente verificar a impossibilidade de impressão. Relativamente aos elementos reprovados cuja importância era relativamente menor, foram selecionados negativamente no parâmetro de impressão "3D Print", não ficando na lista final de elementos para impressão. De entre os elementos não incorporados no modelo de impressão, destaque para os corrimãos das escadas, tetos falsos, equipamentos de quarto de banho e cozinha, elementos de jardim, entre outros.

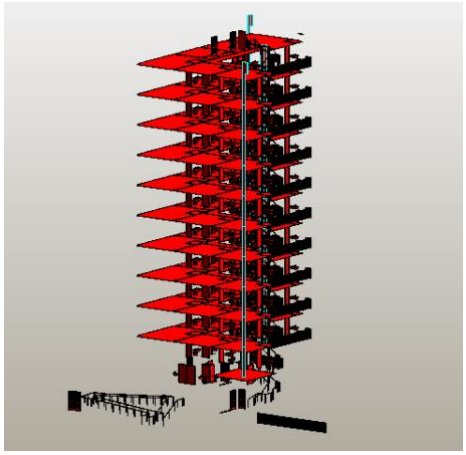


Figura 83 – Conjunto de elementos reprovados à verificação dimensional.

A partir dos elementos selecionados positivamente para impressão, prosseguiu-se para a exportação do modelo no formato geométrico SAT. A opção pela exportação no formato SAT permite libertar muita informação desnecessária para a operação de divisão do modelo e consequentemente utilizar uma menor quantidade de processamento por parte do computador. Num projeto de elevadas dimensões, como o do caso em estudo, a utilização de um modelo puramente geométrico nos procedimentos de divisão verificou-se uma opção viável para agilizar todo o processo.

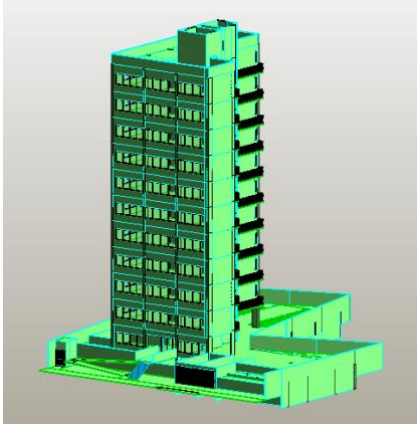


Figura 84 – Modelo resultante da seleção para impressão.

Uma vez que um dos objetivos do modelo impresso passa pela massificação de todos os pisos à exceção do piso correspondente à secção de divisão, o modelo deverá sofrer alterações de modo a permitir a utilização da metodologia abordada anteriormente neste trabalho. Este passo do processo de preparação poderia ter sido executado em qualquer momento anterior, sem qualquer influência nos resultados obtidos até aqui.

De modo a conseguir obter um modelo maciço, o método utilizado para preencher o modelo inclui a criação de *Rooms*, cujo volume corresponde ao espaço interior de cada uma das divisões. Assim, piso a piso, gerou-se uma referência relativa a cada divisão, delimitada pelas suas paredes, pelo piso respetivo e pelo piso imediatamente acima. Na imagem que se segue (Figura 85) está exemplificada a distribuição de *Rooms* para um dos pisos. Como se pode observar, todas os espaços fechados, sem exceção, foram referenciados.

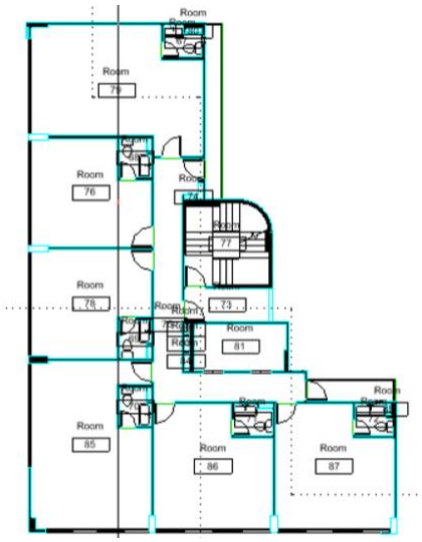


Figura 85 – Vista em planta de um piso do edifício com atribuição de *Rooms*.

Uma vez preparado o modelo, inicia-se a preparação da divisão do mesmo. No caso em estudo, pretendia-se a divisão do modelo sobre uma secção correspondente a um qualquer dos pisos-tipo, garantindo que esse mesmo piso não seria abrangido pelo processo de massificação. Neste caso, optou-se por não referenciar o piso em questão. No entanto, poderiam ter sido utilizadas outras metodologias que garantiam exatamente o mesmo resultado, tal como referenciar todos os pisos e no processo de seleção da geometria, não selecionar os elementos correspondentes ao piso em questão.

De acordo com o tipo de divisão pretendida e uma vez que cada parte resultante da divisão inclui vários pisos do projeto, optou-se por uma a divisão por *scope box*. Este tipo de divisão permite um ajuste preciso e de fácil manipulação. Esta característica torna-se ainda mais importante, sempre que a referência de corte necessite de estar posicionada de modo a que as duas peças resultantes estejam devidamente alinhadas.

Na Figura 86, estão representadas as duas caixas de seleção (*scope boxes*) utilizadas na divisão, cuja face de contacto está posicionada no topo do piso 6, precisamente na secção de corte pretendida.

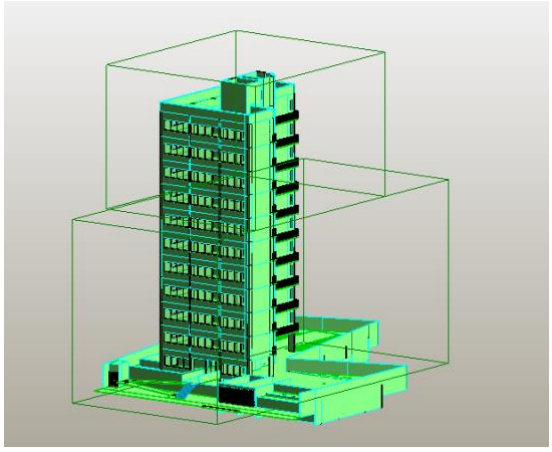


Figura 86 – Modelo com as *scope box*es correspondentes à divisão em estudo.

A partir do modelo exportado sobre o formato geométrico SAT, das referências *Room* e das caixas de seleção *scope box*, procedeu-se à divisão, massificação e aplicação automática dos fixadores. Neste passo é processado em simultâneo cada um dos *scripts* estudados. Para tal começa-se por importar o modelo SAT para o Dynamo. A sua geometria é então intersectada com a região de seleção da *scope box* respetiva. Ao mesmo tempo, esta é também intersectada com o volume correspondente aos volumes interiores *Rooms*. Com a união dos dois volumes resultantes, relativo ao modelo e ao seu volume interior, é então obtida uma lista com a totalidade dos sólidos correspondente ao modelo maciço dividido.

Relativamente à colocação dos encaixes e das respetivas aberturas, conforme as indicações descritas anteriormente neste documento, escolheu-se o piso correspondente à divisão. Para a parte inferior da divisão selecionou-se arbitrariamente o piso 6 e para a parte superior selecionou-se o piso 7. Para o caso em estudo optou-se pela criação de um fixador com secção circular com 0,05 m de raio e com 0,40 m de altura, medidas nas unidades do projeto e uma abertura com um rácio de 1,2 relativamente às dimensões referidas. No projeto em causa utilizaram-se elementos do tipo "*column*" como referência para a colocação dos fixadores. Porém, as faces superiores dos pilares utilizados encontram-se desfasadas da secção de corte. Para contornar esta situação recorreu-se a um *offset* de 0,30m das coordenadas dos pontos segundo o eixo Z, medida exata da distância entre as duas secções.

Devido a problemas da versão do programa em utilização (Dynamo Revit 1.3.3.4111), e devido à complexidade de um modelo da dimensão do utilizado, o programa apresentou vários problemas no processamento da função de fusão dos elementos "*Solid.ByUnion*", pelo que não se pôde utilizar esta ferramenta. Desta forma, o modelo exportado neste caso de estudo não se encontra fundido numa peça única.

Por fim, exportou-se o modelo a dois tempos. Primeiramente, a metade inferior e de seguida a metade superior. A ordem de exportação não é relevante, mas é importante que sejam processadas em momentos distintos. O mecanismo de exportação por STL do Revit incorpora todos os elementos visíveis na vista selecionada. Portanto, uma exportação do modelo completo iria resultar num modelo não dividido.

O resultado do modelo exportado pelo Revit está disponível na imagem da Figura 87. Na imagem à esquerda é possível observar as duas peças devidamente encaixadas uma na outra e na imagem à direita as duas peças separadas.

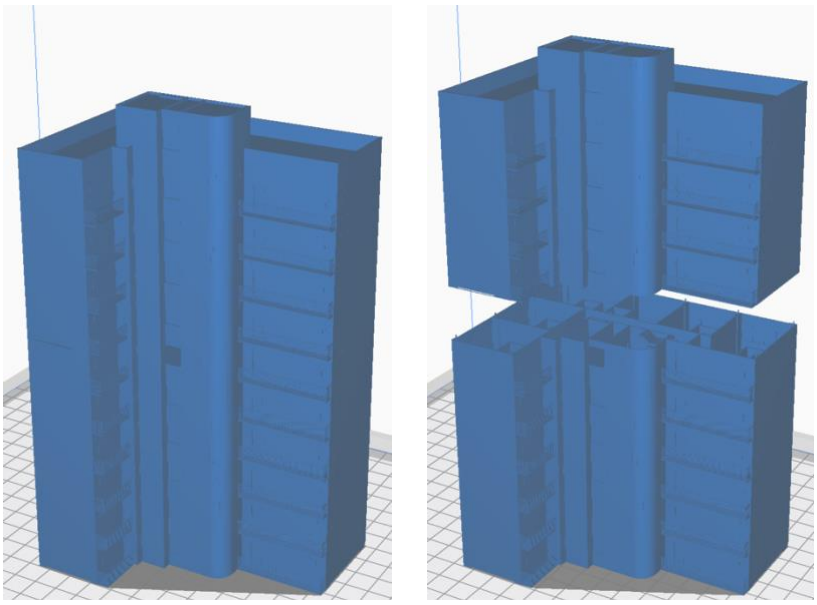


Figura 87 – Modelo dividido exportado, encaixado e separado, à esquerda e direita respetivamente.

4.2.3.1.2. Preparação da impressão

Uma vez obtido o modelo no formato STL, dividido e com todas as alterações necessárias, o modelo está preparado para iniciar o processo de preparação da impressão. Nesta fase deverão ser definidas as especificações da impressão. O utilizar deverá optar pela tecnologia de impressão que pretende, definir as medidas relativas à espessura de cada camada, percentagem de preenchimento interior, espessura das paredes exteriores do objeto e deverá ainda escolher o material, a orientação do modelo e a geometria das estruturas de suporte.

Neste passo do processo de impressão é importante escolher a orientação mais adequada. Neste caso de estudo, a posição natural é a posição mais indicada para impressão, uma vez que diminui o uso de estruturas de suporte e acima de tudo garante uma superfície do modelo com mais detalhe, qualidade e homogeneidade. A adição das estruturas suportes é feita automaticamente e será colocada nos elementos sem capacidade de se autossustentarem durante a impressão, com inclinações superiores a 60º, tal como é o caso das varandas e dos vãos.

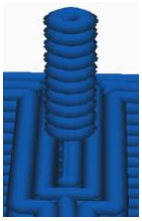
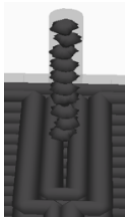
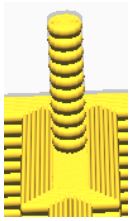
Na Tabela 5 é possível analisar a variação dos valores de quantidade de material e do prazo de impressão para as várias especificações de impressão. Os valores indicados são relativos a um modelo específico de impressora calculados pelo Cura, pelo que deverão mudar para as diferentes impressoras no mercado.

Tabela 5 – Valores exemplificativos dos parâmetros de impressão.

Modelo	Configuração	Espessura de camada (μm)	Preenchimento interior (%)	Diâmetro do *nozzle* (μm)	Expansão Horizontal (mm)	Tecnologia de impressão	Material	Material gasto (g)	Estimativa de duração (h:m)	Estimativa de custo (por parte)[3]
Parte Inferior + Parte Superior	1	200	10	400	0	FDM[4]	PLA	330	28h:47m [5]	€€
	2	100	10	400	0	FDM[4]	PLA	335	87h:50m [5]	€€
	3	200	15	400	0	FDM[4]	PLA	371	30h:24m [5]	€€
	4	200	10	400	0,150	FDM[4]	PLA	339	29h:31m [5]	€€
	5	200	10	400	0	FDM[4]	ABS	301	37h:18m [5]	€€
	6	100	10	250	0	FDM[4]	PLA	304	134h:59m[5]	€€
	7	200	10	67	0	SLA[6]	Resina	-	46h:06m [5]	€€€

Na Tabela 6 estão exemplificadas as simulações da impressão de um pormenor construtivo para as diferentes configurações descritas na tabela anterior. Para cada impressão selecionou-se uma das estruturas de fixação como meio de comparação. Todas as simulações foram processadas pelo Cura.

Tabela 6 – Figuras correspondentes a um detalhe exemplificativo da configuração.

Conf.	1	2	3	4	5	6	7
Fig.							

[3] Custos baseados num intervalo de valores referenciados pelo 3DHubs.com
[4] Valores de referência para uma impressora FDM Ultimaker S5, calculados no Cura 4.0.0..
[5] Duração de impressão estimada pelo Cura 4.0.0, poderá variar.
[6] Valores de referência para uma impressora SLA Peopoly Moai, calculados no Cura 4.0.0..

4.2.4. RESULTADOS

A impressão do modelo do caso de estudo nº1 apresenta um nível elevado de dificuldade de impressão. A escala utilizada conjuga exigência do detalhe dos elementos mais pequenos com um modelo de grandes dimensões.

Na preparação do modelo, a versão do *software* em utilização demonstrou dificuldades na gestão da geometria do projeto do edifício. Devido à complexidade da geometria e das operações que constituem a ferramenta de fusão do modelo "*Solid.ByUnion*", esta falhou no processo de preparação. Deste modo, como resultado, o objeto final não se encontra totalmente fundido apresentando ainda assim uma geometria satisfatória.

O processo também revelou dificuldades na criação dos volumes interiores. Devido às especificações com que o projeto foi modelado, o Revit não conseguiu executar corretamente a criação de volumes interiores para duas das divisões do piso-tipo, apresentando, no entanto, os resultados ideais para as restantes. Este problema resulta num modelo parcialmente maciço, que por um lado vem comprovar a efetividade da metodologia quando o modelo está preparado para tal e por outro como pode falhar caso o modelo não esteja convenientemente preparado. Uma vez que o modelo apenas ficou parcialmente maciço o resultado reflete-se num processo de impressão mais demorado e dispendioso em gastos desnecessários de material. Consequentemente, os elementos de menores dimensões presentes nas divisões em causa poderão apresentar, igualmente, problemas de impressão, nomeadamente os vãos envidraçados.

Nos restantes processos de preparação como a verificação dimensional, a divisão por *scope box* e a adição automática de fixadores, o modelo foi executado com sucesso, não apresentando nenhum problema inesperado.

No que diz respeito à preparação da impressão propriamente dita, foram apresentadas sete configurações possíveis para dois tipos de tecnologias, FDM e SLA. Devido às características geométricas do modelo já ilustradas, a escolha dos parâmetros de impressão revelou-se um passo muito criterioso. Para cada uma das configurações pretende-se exemplificar a variação na impressão de elementos pormenorizados, nomeadamente de uma das estruturas de fixação. Nas imagens referidas, ficaram demonstradas as alterações que cada parâmetro pode implicar na impressão do modelo e no quadro as consequências em termos de material, tempo e custo.

De todas as configurações assinaladas, para as impressoras FDM verificou-se que a escolha por uma espessura de camada inferior tem poucas implicações na geometria do modelo. Por outro lado, a opção por uma agulha (*nozzle*) de impressão de diâmetro inferior trouxe grandes melhorias de resolução no plano horizontal, permitindo a impressão com êxito dos fixadores. Ainda assim, esta opção não se revelou suficiente para imprimir as janelas, portas e os guarda-corpos. Para evitar este problema, a única solução que se revelou viável foi a que aplica uma expansão horizontal de todos os elementos maciços do modelo. Tal como referido, esta solução implica uma expansão de todos os elementos, inclusive dos fixadores, que a partir do momento em que são expandidos deixam de ser compatíveis com as aberturas dimensionadas na preparação do modelo. Assim, esta configuração implica sempre um redimensionamento das aberturas respetivas antes da sua impressão. Relativamente ao preenchimento interior, o valor ideal parece estar fixado nos 10%, uma vez que o aumento para os 15% implica um aumento de cerca de 10% de material, que não se reflete num ganho para a utilização da maquete. Foi testada ainda a variação causada por diferentes opções de material, nomeadamente de PLA e ABS. A escolha pelo ABS poderia ser útil para garantir uma maior resistência mecânica ao modelo, no entanto esta revela-se uma escolha mais dispendiosa quer em termos de custos associados, quer em termos de período de impressão, que não se refletem nas vantagens na utilização da maquete em estudo.

Na configuração relativa à impressão do tipo SLA, verificou-se que a capacidade de imprimir numa resolução muito superior no plano horizontal permite obter um modelo muito detalhado e fiel ao modelo exportado pelo Revit. Assim, sem efetuar qualquer tipo de alteração geométrica do modelo, todos os elementos são impressos. Este tipo de impressão, tem o inconivente de apresentar um custo várias vezes superior aos apresentados pelas impressões FDM.

4.3. CASO DE ESTUDO 2: TUBO DE VENTILAÇÃO

4.3.1. APRESENTAÇÃO DO PROJETO

No segundo caso de estudo, optou-se pela impressão de um modelo tipologicamente diferente do primeiro, com características geométricas que se revelassem obstáculos para a utilização dos métodos estudados. Em causa está um projeto de um tipo de obra mais especializada, referente a um tubo de ventilação em betão armado com 6,50 m de diâmetro, construído no âmbito de uma obra numa linha de metropolitano. Na Figura 88 está apresentada uma vista 3D do modelo em causa, no Revit.

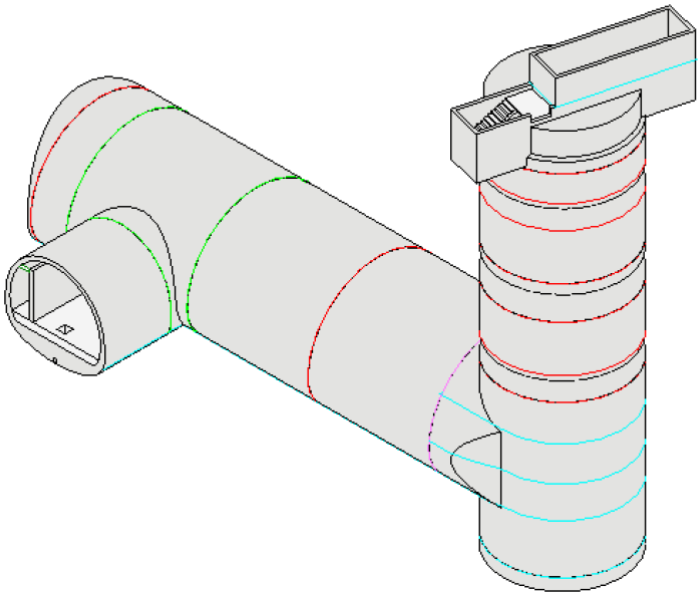


Figura 88 – Vista 3D do projeto de estudo.

4.3.2. OBJETIVOS

A escolha de um modelo de um tubo de ventilação para o caso de estudo nº2 tem como ponto principal demonstrar o processo de preparação de modelos diferenciados a partir das ferramentas desenvolvidas no capítulo anterior. Para o caso de estudo nº 2, delineou-se como objetivo principal imprimir duas versões do modelo do projeto referido, dividido de formas diferentes. Numa das divisões, o intuito passa por fracionar o modelo pelas secções respetivas às juntas de dilatação. Na outra divisão, o objetivo passa por dividir o modelo segundo o seu eixo central, obtendo assim uma divisão longitudinal do mesmo. Nas duas divisões delineadas pretende-se igualmente a colocação de estruturas de fixação.

Pretende-se, também, estudar as especificações técnicas de impressão que um modelo com a geometria do projeto do caso de estudo nº2 implica, os seus custos e implicações na utilização de material e de tempo de impressão. Uma vez que se vai executar a impressão dos dois modelos divididos, tenciona-se

testar os vários métodos de pós-processamento a aplicar para as várias tecnologias e materiais de impressão, nomeadamente SLA (Resina) e FDM (PLA e ABS).

4.3.3. DESENVOLVIMENTO

4.3.3.1. Pré-processamento

4.3.3.1.1. Preparação do Modelo

O procedimento de preparação dos modelos para os dois tipos de divisão é exatamente o mesmo. Este desenrola-se a partir da verificação da geometria de cada um dos elementos do projeto, da sua seleção, consequente divisão e pela aplicação dos fixadores.

O primeiro passo, conforme o processo do caso de estudo nº1, começa pela verificação dos parâmetros relativos às dimensões de comprimento, largura, altura e volume de cada um dos elementos. Para tal, definiu-se a escala de impressão pretendida (1/333). Os requisitos de impressão mantiveram-se (0,25 mm de espessura e 0,25 mm^3 de volume).

Para a verificação dimensional foram carregados todos os elementos do modelo, contemplando um total de 64 elementos. No resultado final da verificação apenas se registou a reprovação de 2 elementos, nomeadamente de duas juntas circulares (Figura 89).

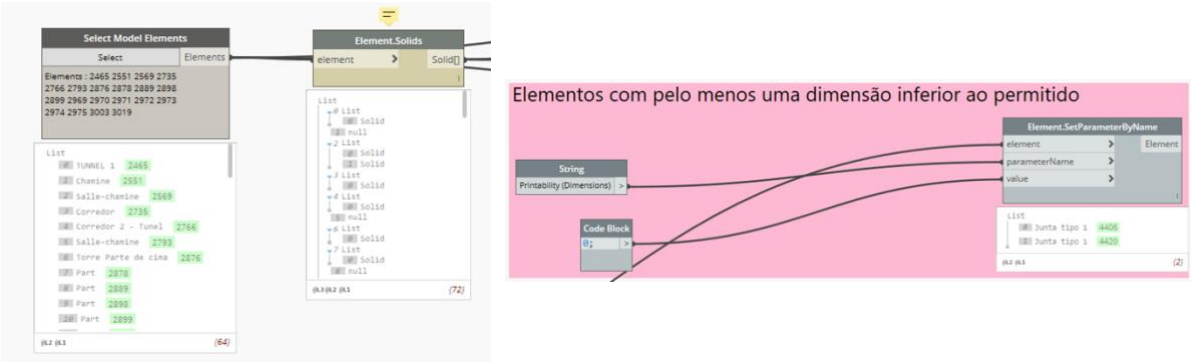


Figura 89 – Nó de importação de elementos à esquerda e resultado da verificação dimensional à direita.

Este tipo de estrutura, representado na Figura 90, está inserido no interior da peça e a sua exclusão poderia resultar na criação de vazios, que por sua vez poderiam ser prejudiciais para o processo de impressão. Por consequência, optou-se pela inclusão destes elementos na lista de elementos a prosseguir para a fase de impressão, obtendo-se assim uma impressão composta pela totalidade do modelo.

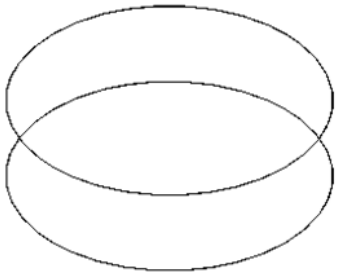


Figura 90 – Elemento reprovado na verificação dimensional segundo as suas dimensões e volume.

Após selecionados todos os elementos a incluir na fase de impressão, demonstrados na Figura 91, exportou-se a geometria do modelo pelo formato SAT. A escolha por uma exportação puramente geométrica está relacionada com o tipo de modelação utilizado neste projeto, que dificulta a seleção dos elementos e o seu processamento.

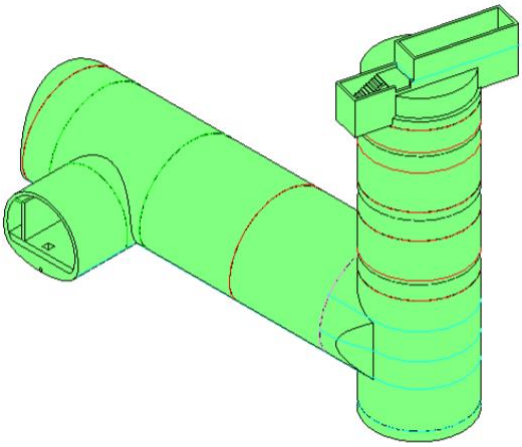


Figura 91 – Modelo com os elementos selecionados para a impressão.

Processada a exportação do modelo, o processo parte para a divisão propriamente dita. De todas as opções disponíveis para a divisão, a mais adequada voltou a ser a divisão por *scope box*. A segmentação de um modelo num elevado número de peças implica um método de divisão ágil e fácil de manipular. Assim, ao criar uma *scope box* para cada uma das regiões, a divisão desenvolve-se de modo praticamente automático. Na figura que se segue (Figura 92), está representado o modelo com as respetivas caixas de seleção colocadas nas posições de divisão, tanto para o modelo dividido pelas juntas de dilatação (à esquerda), como para o modelo dividido pelo eixo central (à direita).

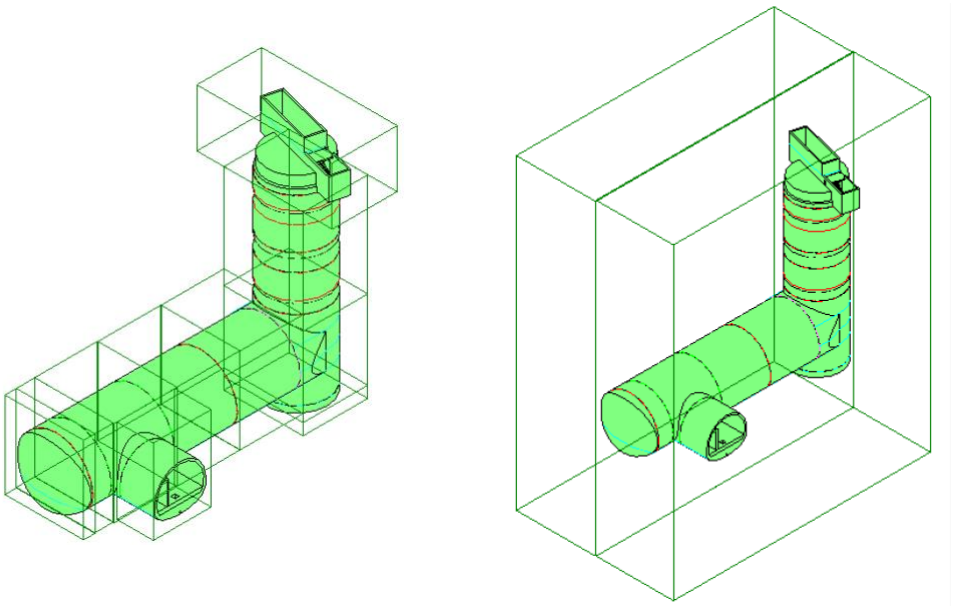


Figura 92 – Modelo com as respetivas caixas de divisão. À esquerda modelo dividido pelas juntas, à direita o modelo dividido longitudinalmente.

Após concluída a criação das diferentes caixas de seleção procede-se para a divisão propriamente dita. Devido à complexidade e à irregularidade da geometria e da divisão, o processo automático para a

colocação de estruturas de fixação não é compatível com o modelo do caso de estudo nº2. Porém, neste documento foi também abordado um processo de colocação manual, que se verifica especialmente útil para a colocação de fixadores em estruturas irregulares. Assim, para cada secção de modelo dividido foram colocados fixadores, sempre com o mesmo raio, 0,225 m mas com uma altura variável, correspondente às limitações geométricas do próprio modelo, que variou desde 0,30 m, 0,50 m e 1 m, medidas na unidade de projeto. Através do *script* desenvolvido para este método manual de colocação de fixadores atribui-se um rácio de 1,10 para as dimensões das aberturas em relação aos fixadores (Figura 93). Neste caso, o rácio diminuiu comparativamente ao caso nº1 (1,20), porque este modelo está sujeito não só a ações horizontais, mas também verticais, razão pela qual as peças necessitam de uma maior coesão entre si.

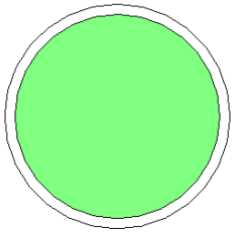


Figura 93 – Secção transversal do fixador, representada a verde, e da respetiva abertura, representada a branco.

O procedimento para a colocação manual dos fixadores é um processo cíclico em que se começa por processar a secção do modelo já munida das aberturas necessárias no Dynamo. A adição dos fixadores ocorre somente depois, no Revit. A secção do modelo é por fim exportada sob a forma de STL e o processo retorna à fase inicial para a secção seguinte.

Nas imagens seguintes (Figura 94 e Figura 95) está representado o modelo do caso de estudo nº2, com as várias peças, todas devidamente encaixadas e de seguida o mesmo modelo separado segundo as divisões pelas juntas de dilatação e longitudinalmente, respetivamente.

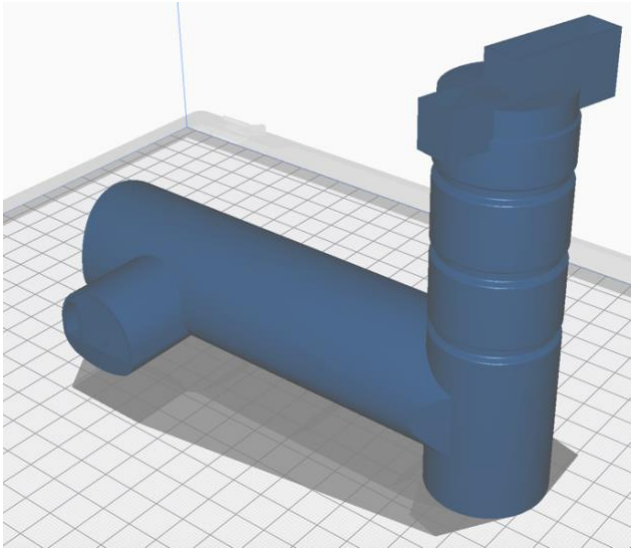


Figura 94 – Modelo do tubo de ventilação com as diferentes peças encaixadas.

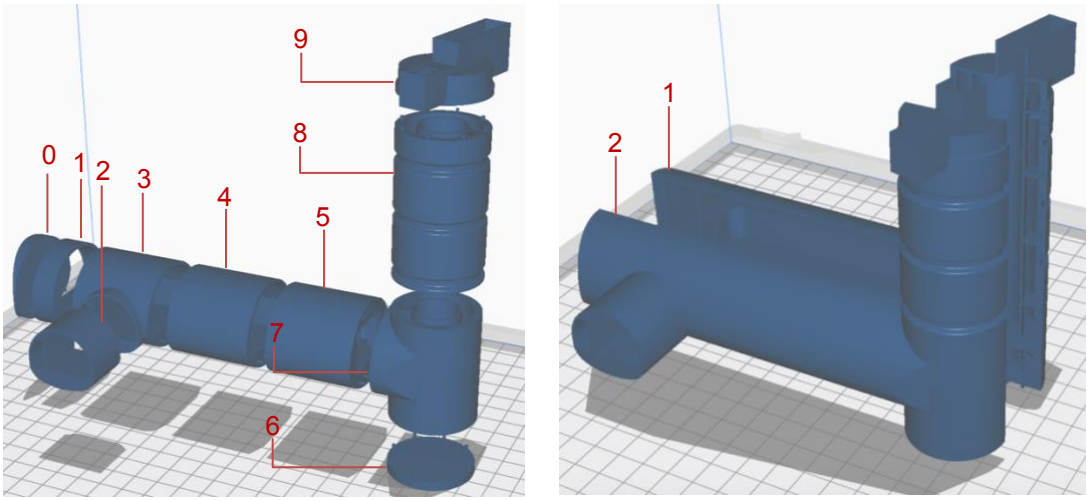


Figura 95 – Modelos do tubo de ventilação com as peças separada. Divisão pelas juntas à esquerda, divisão longitudinal à direita.

4.3.3.1.2. Preparação da impressão

A preparação dos dois tipos de divisão do caso de estudo nº2 seguem um raciocínio semelhante ao aplicado no caso de estudo nº1. Tratando-se de um modelo menos detalhado, torna-se mais fácil para a impressora replicar a geometria dos modelos. No entanto, em algumas destas peças a escolha da orientação revelou-se uma tarefa complicada, tendo forçosamente de imprimir superfícies curvas no eixo vertical, alinhado com as camadas de impressão, que consoante os parâmetros de impressão escolhidos podem revelar um detalhe mais baixo.

Para a preparação da impressão testaram-se sete configurações de impressão diferentes, novamente para dois tipos de tecnologia, SLA e FDM. A geometria arredondada, em várias das peças a imprimir, obrigou a que se optasse por uma orientação que colocasse as secções arredondas do modelo numa posição normal ao plano horizontal, de modo a aproveitar uma maior resolução da impressão no plano XY. No entanto, algumas das peças em causa, tais como a peça nº3 da divisão por juntas ou qualquer uma das duas peças da divisão longitudinal, apresentam, forçosamente, secções circulares em diferentes posições, impedindo a existência de uma orientação ideal.

Uma vez mais optou-se por uma colocação automática das estruturas de fixação, tendo em conta um ângulo máximo de inclinação de 60º.

Na tabela que se segue (Tabela 7) estão demonstradas para as várias configurações as variações de material gasto, do respetivo custo e do tempo de execução estimado para os dois casos. Na divisão por juntas, exemplificou-se apenas uma das dez peças, nomeadamente a peça nº 3 e na divisão longitudinal a peça nº2, conforme assinalado na Figura 95.

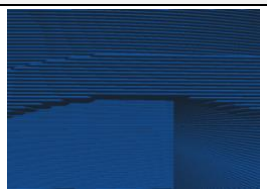
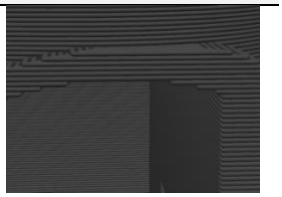
Relativamente aos parâmetros em estudo e às diferentes configurações, mantiveram-se as mesmas do caso de estudo nº1 à exceção do parâmetro da expansão horizontal, uma vez que esta não iria trazer qualquer vantagem para esta impressão. Adicionalmente, testou-se ainda uma configuração de impressão de camada muito fina (60 μm), para exemplificar o seu efeito nas superfícies curvilíneas.

Tabela 7 - Valores exemplificativos dos parâmetros de impressão.

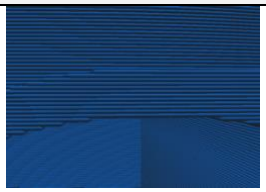
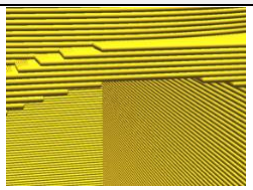
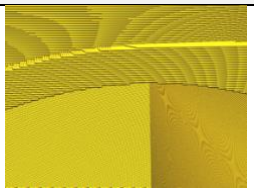
Modelo	Configuração	Espessura de camada (μm)	Preenchimento interior (%)	Diâmetro do *nozzle* (μm)	Tecnologia de impressão	Material	Material gasto (g)	Estimativa de duração (h:m)	Estimativa de custo (por parte)[7]
Divisão por Juntas (Peça nº3)	1	200	10	400	FDM[8]	PLA	15	1h:38m [9]	€
	2	100	10	400	FDM[8]	PLA	16	4h:49m [9]	€
	3	200	15	400	FDM[8]	PLA	13	1h:59m [9]	€
	4	200	10	400	FDM[8]	ABS	13	1h:59m [9]	€
	5	100	10	250	FDM[8]	PLA	18	8h:19m [9]	€
	6	200	10	67	SLA[10]	Resina	-	2h:13m [9]	€€
	7	60	10	67	SLA[10]	Resina	-	5h:24m [9]	€€
Divisão Longitudinal (Peça nº2)	1	200	10	400	FDM[8]	PLA	74	7h:23m [9]	€€
	2	100	10	400	FDM[8]	PLA	81	26h:52m [9]	€€
	3	200	15	400	FDM[8]	PLA	76	7h:26m [9]	€€
	4	200	10	400	FDM[8]	ABS	72	9h:46m [9]	€€
	5	100	10	250	FDM[8]	PLA	84	37h:51m [9]	€€
	6	200	10	67	SLA[10]	Resina	-	7h:47m [9]	€€€
	7	60	10	67	SLA[10]	Resina	-	20h:13m [9]	€€€

Na Tabela 8 está representado um detalhe construtivo para cada umas das configurações de impressão do modelo. A secção representada para os vários casos é de peça nº3 da divisão do modelo pelas juntas de dilatação.

Tabela 8 – Figuras correspondentes a um detalhe exemplificativo da peça nº3 da divisão pelas juntas de dilatação para cada uma das configurações.

Conf.	1	2	3	4
Fig.				

[7] Custos baseados num intervalo de valores referênciados pelo 3DHubs.com
[8] Valores de referência para uma impressora FDM Ultimaker S5, calculados no Cura 4.0.0..
[9] Duração de impressão estimada pelo Cura 4.0.0, poderá variar.
[10] Valores de referência para uma impressora SLA Peopoly Moai, calculados no Cura 4.0.0..

Conf.	5	6	7
Fig.			

4.3.3.2 Impressão

Para o caso de estudo nº2 optou-se por executar os dois tipos de divisão apresentados. Para tal recorreu-se a um serviço *online* de impressão denominado de 3D Hubs, que lista várias empresas de impressão locais.

A utilização deste tipo de serviço permite o acesso a múltiplas tecnologias e materiais, no entanto é importante referir que o tempo de produção ultrapassou o prazo estimado, inicialmente estipulado para um período inferior a uma semana, acabando por durar cerca de duas semanas.

Para emular na prática algumas das configurações estudadas selecionou-se a impressão de algumas das peças em FDM e das restantes em SLA. Para as impressões FDM testaram-se espessuras na ordem dos 100 μm e 200 μm, em PLA e ABS, respetivamente. Relativamente à impressão do tipo SLA, optou-se por uma espessura de camada de 25 μm em resina.

Uma vez que se trata de um serviço de subcontratação, a escolha das configurações de cada impressão fica ao encargo da entidade que executa a impressão. O cliente pode apenas selecionar o tipo de impressão que pretende, o correspondente material (tipo e cor) e a espessura de camada. Todos os restantes parâmetros, como a percentagem de preenchimento interior, a colocação dos suportes e a orientação, são definidos pela própria entidade. Na Tabela 9 estão representados os valores correspondentes às configurações utilizadas nesta impressão, assim como o respetivo custo. Neste tipo de serviços, as impressões de vários clientes são impressas em simultâneo de modo a poupar tempo e material. Por esta razão não é possível contabilizar o tempo de produção das diferentes peças.

Tabela 9 – Configurações e resultados das impressões do caso de estudo nº2.

Modelo	Peça	Espessura de camada (μm)	Preenchimento interior (%)	Tecnologia de impressão	Material	Massa da peça (g)	Custo (sem taxas)
Divisão por Juntas	0	100	27	FDM	PLA	4	1,64 €
	1	100	27	FDM	PLA	4	1,49 €
	1	200	27	FDM	ABS	3	1,41 €
	1	25	100	SLA	Resina	4	4,60 £
	2	100	27	FDM	PLA	5	1,85 €
	3	25	100	SLA	Resina	18	15,43 £

Modelo	Peça	Espessura de camada (μm)	Preenchimento interior (%)	Tecnologia de impressão	Material	Massa da peça (g)	Custo (sem taxas)
	4	100	27	FDM	PLA	13	5,08 €
	5	100	27	FDM	PLA	13	5,29 €
	6	200	27	FDM	ABS	3	1,12 €
	7	25	100	SLA	Resina	28	19,98 £
	8	100	27	FDM	PLA	26	10,68 €
	9	100	27	FDM	PLA	6	1,20 €
Divisão Longitudinal	1	100	27	FDM	PLA	53	27,31 €
	2	100	27	FDM	PLA	67	27,74 €

Na imagem da Figura 96 está demonstrado o processo de impressão do tipo FDM. Como é possível visualizar, a impressão organizou várias peças de modo a realizar a impressão de uma vez só.

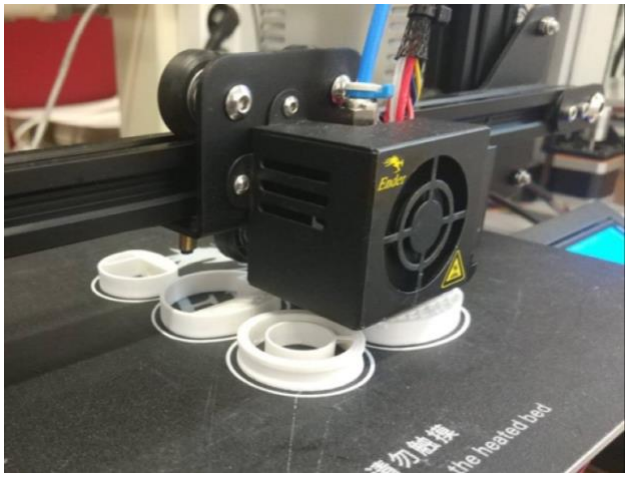


Figura 96 – Fotografia do processo de impressão tirada pelo operador da impressão.

4.3.3.3. Pós-processamento

Com a utilização deste tipo de serviços, o cliente tem a oportunidade de fazer os tratamentos de pós-processamento ou de pedir à entidade que realizou a impressão que os execute. Face à indisponibilidade dos equipamentos indicados para o fazer, nesta impressão foi pedido que esta parte do procedimento fosse feito pelo próprio serviço contratado.

Os métodos utilizados no pós-processamento não foram divulgados, mas limitaram-se ao tratamento das superfícies, com o objetivo de alisar as superfícies curvas.

Na Figura 97 está demonstrada a peça nº1 da divisão por juntas de dilatação, produzida por impressoras FDM e SLA, em ABS, PLA e resina. As espessuras utilizadas nestas impressões foram respetivamente 200, 100 e 25 μm.

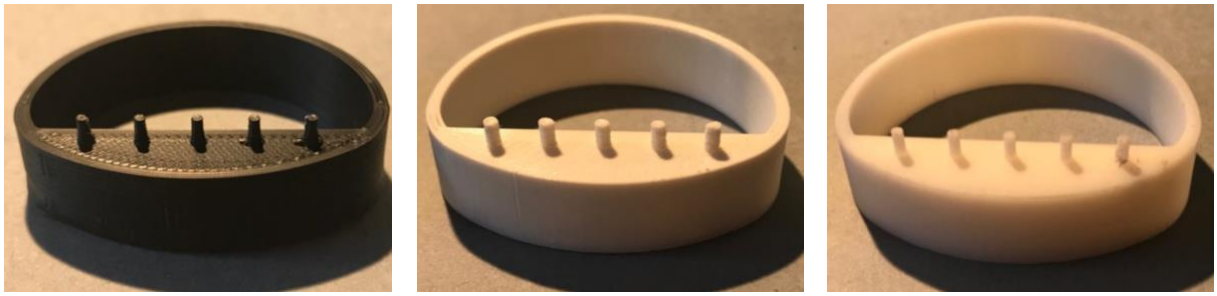


Figura 97 - Peça nº 1 da divisão por junta do caso de estudo nº2, impressa em ABS, PLA e resina, representadas da esquerda para a direita, respetivamente.

Na Figura 98 é possível observar o resultado final da impressão do tipo FDM em PLA e espessura 100 μm da peça nº1 da divisão do caso de estudo nº2 por divisão longitudinal.

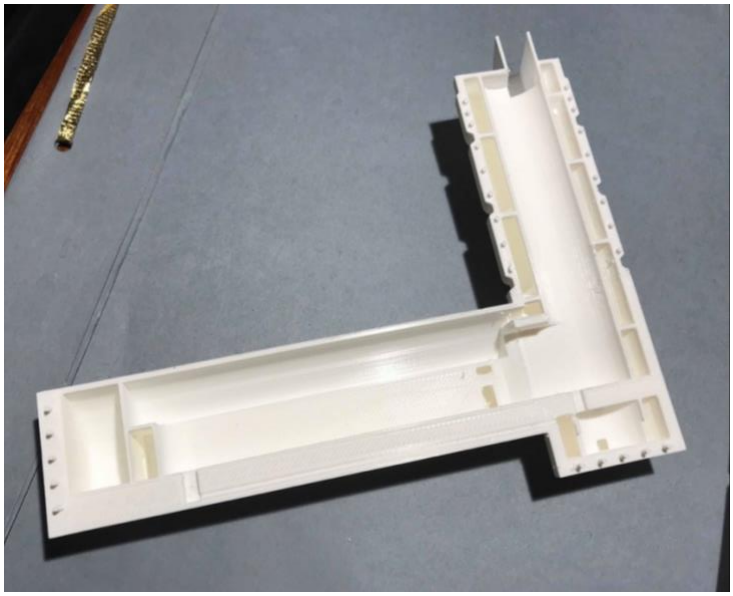


Figura 98 - Peça nº1 da divisão longitudinal do caso de estudo nº2, impressa em PLA.

4.4.4. Resultados

4.4.4.1. Pré-processamento

Analogamente ao caso de estudo nº1, o pré-processamento da impressão 3D não decorreu sem qualquer incidência, mas ainda assim apresentou resultados bastante positivos. Apesar do projeto do tubo de ventilação em estudo ter uma geometria pouco regular, apresenta um nível de detalhe mais reduzido que o projeto do prédio do caso nº2. Essa realidade pode ser inclusive verificada pelo número de elementos reprovado na verificação dimensional, mesmo para uma escala muito menor (1/333 no caso de estudo nº2, 1/200 no caso de estudo nº1).

A preparação do modelo envolveu a análise dimensional do modelo, a divisão do mesmo e colocação manual dos encaixes. A análise dimensional decorreu sem qualquer ponto a assinalar, resultando em apenas dois elementos reprovados.

Para a divisão, utilizando o mesmo tipo de metodologia de divisão por *scope box* do caso de estudo nº1, registou-se a ocorrência de algumas falhas no processamento dos *scripts*, nomeadamente na função de união, *Solid.ByUnion* (o mesmo tipo de erro do caso de estudo nº1). Na divisão por juntas, foi colocada uma *scope box* sobre as juntas, resultando para cada, uma peça diferente. Das dez caixas colocadas, apenas uma apresentou problemas na ferramenta de união dos elementos. Relativamente à divisão longitudinal, ambas falharam neste ponto. O processo teve de prosseguir sem recorrer à fusão da geometria nos casos assinalados.

No que diz respeito à colocação manual dos fixadores e à criação das respetivas aberturas, o processo foi bem-sucedido, resultando numa peça com a geometria pretendida, sem qualquer tipo de falha a registar.

Para a preparação da impressão, tal como referido foram testadas sete configurações de impressão, para as tecnologias SLA e FDM. Para as várias configurações verificou-se o modo como afetou cada um dos detalhes da peça em causa. A utilização de uma impressão de camada de espessura inferior confirmou-se como uma boa opção para a produção de geometrias circulares, normais ao plano da base. Quanto menor a espessura escolhida, melhor se observou a superfície da peça. Igualmente, com a utilização de diâmetros mais baixos da agulha de impressão (*nozzle*), mais componentes detalhadas ficaram corretamente impressas, como se pode também observar na Figura 100. Estas vantagens refletiram-se numa peça com uma qualidade muito mais elevada mas com custos e durações de impressão muito superiores.

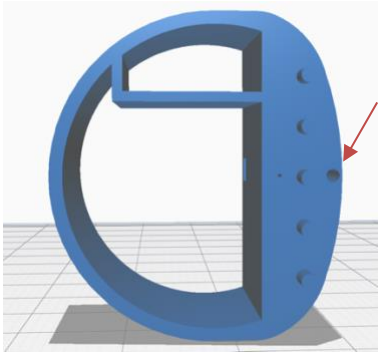


Figura 99 – Peça nº2 do modelo de divisão por juntas de dilatação.

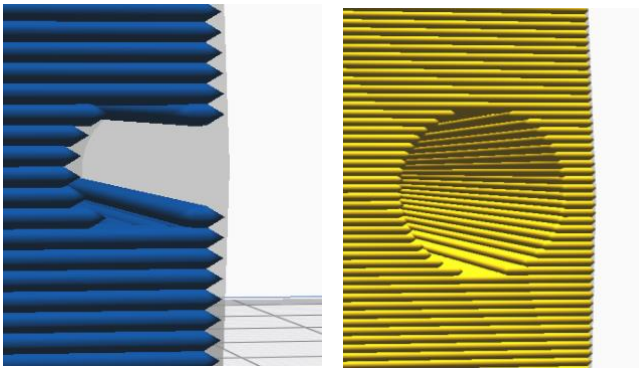


Figura 100 – Comparação de detalhe de impressão da peça nº2 do modelo de divisão por juntas de dilatação para a configuração 1 e 7 da divisão por juntas.

A opção pela tecnologia SLA permite, neste tipo de geometria, um acabamento muito superior, não só do ponto de vista da espessura de cada camada, como na própria resolução segundo o eixo XY. O resultado final é uma peça com um acabamento superficial muito mais suave.

Relativamente às restantes peças, a orientação utilizada permitiu obter superfícies mais lisas, sem ter de recorrer a impressões com configurações exigentes. Para estas peças, a escolha da orientação revelou-se suficiente para obter um modelo de boa qualidade.

4.4.4.2. Impressão e Pós-processamento

A impressão dos modelos com recurso à contratação de um serviço revelou-se bastante simples e eficiente. Apenas foi necessário transferir os ficheiros STL para à entidade que operou a impressão.

As peças foram impressas com uma qualidade elevada e de acordo com o esperado, as superfícies apresentaram a geometria pretendida e os materiais escolhidos conferiram robustez às peças. Apesar de todo o cuidado, registou-se algum excesso de material junto dos fixadores, principalmente nas peças impressas pela tecnologia FDM. Este excesso verificou-se suficiente para impedir o funcionamento dos mecanismos de assemblagem criados. No entanto, este tipo de problema é possível de reverter mediante a limagem dos mesmos. Observou-se também uma alteração da geometria na peça nº2, de acordo com o relatado na Figura 100 e constatado na Figura 101, apesar da orientação de impressão diferente.

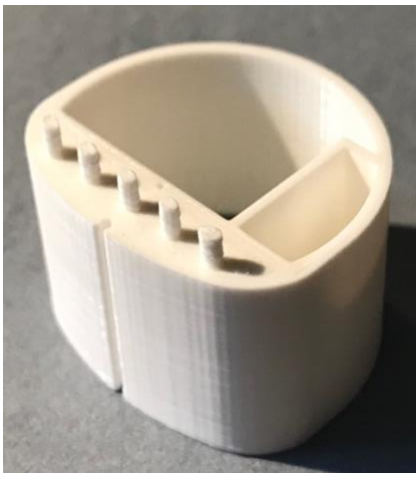


Figura 101 – Peça nº2 do modelo de divisão por junta, impresso em FDM, PLA e espessura de 100 μm.

Globalmente, os resultados do modelo impresso e da sua preparação foram satisfatórios, com a obtenção de um modelo de qualidade, robusto e funcional (para as peças impressas pela tecnologia SLA ou para as restantes, mediante a limagem dos fixadores).

4.4. ANÁLISE DO PROCESSO DE TRABALHO

Os casos de estudo colocaram em prática vários dos procedimentos desenvolvidos nesta dissertação de mestrado. A partir da preparação/impressão dos dois modelos estudados verificou-se quais as tarefas que funcionaram de acordo com o planeado e quais evidenciaram algum tipo de falha. Deste modo, cada um dos processos utilizados apresenta a seguinte analise:

- Seleção dos Elementos: Nos dois casos estudo este procedimento confirmou-se como um passo simples, útil e eficiente. A criação dos parâmetros e a seleção dos elementos facilitou toda a gestão do modelo de preparação.
- Filtragem Dimensional: Apesar de apresentar resultados, todo o processo acabou por exigir uma capacidade de processamento elevada ao computador, revelando-se assim como uma das etapas mais demoradas de todo o processo. Quanto aos resultados, foram positivos ao permitir filtrar vários elementos que falharam nos requisitos geométricos de cada um dos casos. É importante referir que não foi possível ainda assim selecionar a totalidade dos elementos não cumpridores da geometria delineada. No entanto, este facto já havia sido evidenciado no capítulo 3.
- Divisão por *Scope Box*: O método de divisão utilizado em ambos os casos foi o da divisão por *scope box*. Por se tratar de um método expedito e versátil, efetuou as mudanças pretendidas sem a ocorrência de nenhuma falha ou outro contratempo a assinalar.
- Adição de Fixadores:
    - Processo Automático: a colocação automática de fixadores sobre pontos estratégicos numa divisão horizontal torna-se bastante útil em casos como o do caso de estudo nº1. Ao colocar as estruturas de fixação sobre os pilares obteve-se uma adição de fixadores minimamente evasiva do ponto de vista visual e ainda assim suficiente para garantir a estabilidade do mesmo. O processo decorreu sem qualquer tipo de falha.
    - Processo Manual: Este processo foi desenvolvido para atuar nas situações não abrangidas pelo processo automático. O caso de estudo nº2 é um caso exemplar. O posicionamento dos fixadores exigia uma colocação criteriosa para a qual o processo automático não estava preparado. Assim, através de um conjunto de ferramentas simples todo o processo decorreu tal como pretendido resultando na geometria objetivada.
- Modelo Maciço: Este passo foi utilizado para tornar todo o modelo do edifício do caso de estudo nº1 maciço, à exceção do piso da divisão. Para a grande maioria do volume interior o resultado foi o ideal, no entanto para algumas das divisões do piso-tipo o Dynamo não foi capaz de importar o volume correspondente e consequentemente adicionar ao modelo final. Deste modo, por se tratar de um erro específico de apenas uma ou duas divisões do modelo, não se poderá retirar nenhuma conclusão acerca do processo, uma vez que o erro poderá estar no modelo BIM.
- União do modelo: Relativamente à ferramenta de união do modelo "*Solid.ByUnion*", verificou-se um pouco inconstante uma vez que esta apresentou dificuldades no processamento das geometrias mais complexas, falhando em alguns dos casos referidos previamente neste capítulo. O problema pode estar relacionado com um *bug* (erro) do programa em uso (Dynamo Revit 1.3.3.4111). A razão não oficial, discutida em vários em fóruns, parece estar relacionada com a dificuldade da realização de operações booleanas em geometrias de alta complexidade. No entanto uma vez que tal não foi reportado pela própria empresa, não se pode afirmar com veemência que esta se trata da causa real.
- Preparação da impressão: Este passo do processo já se encontra muito trabalhado pelas diferentes indústrias que utilizam a impressão 3D no seu fluxo de trabalho. Por esta razão programas como o Cura apresentam poucos erros no processamento dos vários parâmetros de impressão. As simulações que foram desenvolvidas neste *software* verificaram-se perto da realidade, evidenciando erros que ocorreram na prática.

Por fim, no caso de estudo optou-se pela impressão a partir da subcontratação de um serviço *online*. Esta opção mostrou alguns aspetos positivos e outros negativos, que no futuro poderão ajudar a escolher entre comprar uma impressora ou contratar um serviço de impressão.

A grande variedade de tecnologias de impressão disponíveis, os vários tipos de materiais, com diferentes cores e características e ainda o acesso a parâmetros de impressão de alta qualidade permitiram obter modelos totalmente personalizados, impressos com um detalhe elevado. Aspetos como o pós-processamento ficaram também ao encargo da empresa subcontratada, que garantiram assim que a peça seria entregue com um número muito limitado de quebras ou outros defeitos resultantes dos processos de tratamento. Todos os erros que assim possam ter ocorrido durante a impressão e o pós-processamento ficaram à responsabilidade da empresa subcontratada, o que evitou qualquer tipo de constrangimento ou custo extra. Para uma impressão esporádica como as do caso de estudo nº2, o custo por peça revelou-se acessível para a quantidade e qualidade das mesmas.

Os principais aspetos negativos a ressalvar estão relacionados principalmente com o tempo de entrega e com a perda de privacidade. O prazo de entrega revelou-se um facto um pouco frustrante, ao ultrapassar o limite estabelecido. O outro aspeto negativo deste tipo de solução está relacionado com a privacidade. A entidade que processa a impressão ficou com acesso a todos os ficheiros do modelo de impressão.

5
CONCLUSÕES FINAIS E FUTURO DA IMPRESSÃO 3D NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

5.1. CONCLUSÕES FINAIS

Com esta dissertação de mestrado estudaram-se as várias vertentes da impressão 3D, nomeadamente as diferentes abordagens das várias tecnologias, o seu processo preparativo, de execução e a sua compatibilização com a modelação BIM. A introdução de processos de impressão 3D nas diversas atividades da Indústria da Construção revelou-se como uma oportunidade com um número significativo de dificuldades associadas.

5.1.1. PREPARAÇÃO DO MODELO

A conciliação das ferramentas de impressão 3D com a metodologia BIM implicou uma grande alteração do processo natural de impressão, mais especificamente na preparação do modelo. Foram criados procedimentos específicos de gestão de detalhe de modelo e da sua compatibilização com os requisitos de impressão. Adicionaram-se ferramentas de manipulação das geometrias, com base tanto na informação geométrica do modelo como nas referências de cada elemento. Desenvolveram-se ainda métodos de divisão e de adição automática e manual de estruturas de fixação que permitem obter modelos desassembláveis, garantindo sempre a sua coesão e estabilidade quando unidos.

A utilização deste tipo de abordagem verificou-se bem-sucedida no que ao resultado final diz respeito. Os casos de estudo são um bom exemplo de uma impressão 3D preparada num *software* BIM. Apesar de tipologicamente os dois casos serem totalmente diferentes e os procedimentos adotados variarem, o resultado prático foi semelhante e positivo. Globalmente o processo resultou num modelo de boa qualidade com a geometria pretendida mas obrigou a um tratamento moroso, pouco expedito e algo complexo, que exigiu uma verificação constante da sua geometria.

Relativamente aos aspetos positivos da metodologia de preparação desenvolvida, destacam-se a efetividade dos processos manuais e automáticos perante os demais modelos estudados. A utilização de ferramentas automáticas de verificação dimensional e de divisão do modelo obtiveram os resultados esperados. Assim, foi possível filtrar elementos inaptos para a impressão, gerir a sua seleção para a impressão e obter a geometria pretendida, devidamente preparada com as estruturas de fixação.

Todavia o processo concebido demonstrou algumas debilidades, nomeadamente nos processos de adição de fixadores e na ferramenta de verificação dimensional. Por se tratar de um projeto somente introdutório da impressão 3D na metodologia BIM, o produto final revelou alguma inaptidão para atuar de modo eficiente perante todos os tipos de projetos existentes no setor da construção. As variadas formas como

um modelo pode ser dividido obrigam a número igualmente elevado de soluções para a colocação de estruturas de fixação. Idealmente, este processo deverá ser capaz de nos demais tipos de divisão, optar pelo melhor tipo de estrutura de fixação e garantir que estas e as correspondentes aberturas são criadas de acordo com as limitações de representação visual do modelo e de acordo com os requisitos de impressão. Para este tipo de objetivo, os métodos automáticos desenvolvidos são ainda pouco experimentados e algo restritivos. A colocação manual, apesar de se revelar útil nos casos não abrangidos pelo processo automático, não é nem deve ser o método ideal para uma utilização recorrente deste tipo de processos. Quanto à ferramenta de verificação dimensional, apesar do procedimento ser totalmente funcional e a sua utilização bastante útil, o *script* desenvolvido não permite ainda apurar com rigor as medidas reais, de espessura, de cada um dos elementos. No método criado, estes valores foram somente baseados na caixa de contorno, que poderá em muitos casos traduzir-se em medidas superiores.

5.1.2. IMPRESSÃO

O outro aspeto abordado neste documento está relacionado com a impressão propriamente dita. Existem vários fatores que influenciam esta fase do processo de impressão, nomeadamente, o tipo de equipamento, os diversos parâmetros de impressão e as várias soluções de adoção da tecnologia (tal como comprar um equipamento ou subcontratar um serviço).

Relativamente aos diversos tipos de tecnologia existentes no mercado e os correspondentes tipos de aplicações, estas implicam, naturalmente, uma escolha algo complexa. A preferência por um equipamento deverá ter por base um estudo cuidado. Escolher um equipamento meramente com base num certo número de características pode levar a uma opção errada. Algumas marcas do setor tendem a referir valores um pouco desviados dos valores verificados numa utilização prática. Outros fatores como a fiabilidade, que tanto envolve o tempo de vida do equipamento como a capacidade de imprimir sem a ocorrência de qualquer de erro ou falha, poderão ser difíceis de contabilizar. Estes factos podem contribuir para uma escolha baseada em valores irreais e/ou irrelevantes, não traduzidos num produto com as propriedades desejadas.

O estudo dos parâmetros da impressão permitiu compreender como é gerida a geometria de um objeto produzido por métodos de fabricação aditiva. A definição de aspetos como a espessura de camada revelaram-se essenciais para a qualidade do produto em causa. Similarmente, a escolha da geometria e da percentagem do preenchimento interior demonstraram-se importantes na poupança de material e de tempo de impressão conferindo integridade ao objeto, com uma massa inferior. A correta seleção dos parâmetros de impressão confirmou-se como um passo fundamental para validar todos os processos deste processo de impressão.

Por fim, a escolha entre comprar um equipamento próprio ou contratar um serviço. Neste trabalho, face ao número de peças a imprimir recorreu-se a um serviço de impressão. A simplicidade de mandar imprimir sem ter de controlar a impressão e ter acesso às várias tecnologias e materiais são os aspetos mais positivos. A demora que possa ocorrer na entrega dos mesmos e falta de privacidade evidenciam-se como os pontos mais negativos. Por outro lado, a compra de um equipamento, tal como referido anteriormente, é uma escolha difícil e pode em muitos casos implicar um compromisso pouco favorável. No entanto, permite um controlo absoluto das impressões o que pode ser útil numa utilização regular.

Globalmente, o trabalho desenvolvido superou as expectativas ao permitir a criação de uma ferramenta funcional de preparação de modelos que numa utilização prática resultou em modelos de alta qualidade. O conhecimento sobre o conceito de impressão 3D foi estudado exaustivamente e proveitoso para a criação de um procedimento de trabalho aplicado à metodologia BIM. Naturalmente haverá ainda muito

trabalho pela frente, tanto a nível da exploração de várias alternativas de preparação como da evolução dos processos criados e da impressão em si.

5.2. FUTURO DA IMPRESSÃO 3D NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

A impressão 3D poderá vir a ter um papel importante no setor da Construção Civil. Como processo de fabrico, a fabricação aditiva permite a elaboração de geometrias fora do alcance das demais alternativas, fabricação subtrativa e moldagem por injeção. Outra particularidade da introdução da 3DP no setor está na utilização dos modelos digitais como base dos vários processos. Um exemplo prático foi o processo estudado neste trabalho. Existem, ainda, vários conceitos que poderão vir a ser praticados no futuro e potencialmente interessantes, tal como a possibilidade de criar uma biblioteca de elementos transversais a vários projetos ou a criação de um armazém virtual de elementos construtivos.

5.2.1. EVOLUÇÃO DO PROCESSO DESENVOLVIDO

O processo de preparação dos modelos BIM desenvolvido nesta dissertação de mestrado é apenas o ponto de partida para a conjugação das duas tecnologias, BIM e impressão 3D. Os métodos desenvolvidos mediante a sua evolução poderão tornar-se mais "inteligentes" e porventura processar todos os tipos de projetos da IC.

Um dos principais objetivos será mesmo o da universalidade do tipo de modelo e de mudanças geométricas a processar, tais como a divisão e a aplicação automática dos devidos encaixes. Idealmente, o processamento de todas as transformações deverá funcionar mediante a simples seleção de uma função de impressão 3D. Os encaixes, que poderão ser fixadores semelhantes aos estudados neste trabalho, ou de qualquer outro tipo, deverão ser posicionados de acordo com o mecanismo pretendido para a divisão, adaptados às especificações da impressora em utilização e de acordo com a geometria do modelo. O programa deverá, assim, ser capaz de autonomamente detetar o posicionamento indevido das estruturas que alterem em demasia ou que sejam colocados em pontos fulcrais da geometria do modelo.

Outro aspeto a melhorar no futuro, será o do método de filtragem de elementos a partir das suas dimensões. De modo a simplificar o processo, neste trabalho recorreu-se às dimensões das caixas de contorno para incluir ou excluir os elementos do modelo. Este método não permite filtrar os detalhes de menor dimensão de cada elemento, nem mesmo detetar a espessura mínima de cada elemento segundo toda e qualquer direção, apenas em X, Y e Z. No futuro seria importante apurar um método expedito que verifique a menor secção de cada um dos elementos em qualquer uma direção possível.

Por fim, seria interessante desenvolver um *software* que fosse capaz de estabelecer uma ligação entre a geometria do modelo BIM e a do modelo preparado para imprimir. Este tipo de ferramenta iria permitir detetar as alterações de modo mais expedito e por conseguinte, avaliar diretamente a inclusão, exclusão ou alteração de um determinado elemento de um modelo.

5.2.2. CRIAÇÃO DE ARMAZÉM VIRTUAL DE GEOMETRIAS

Um projeto que pode trazer alguma inovação para o setor da Construção é da criação de um armazém virtual de elementos. Um pouco à semelhança do que já é feito noutras indústrias, a criação de um armazém virtual de elementos permite ter acesso direto à geometria de qualquer pormenor construtivo de uma determinada construção realizada anteriormente.

Atualmente existe a possibilidade de armazenar a geometria de um elemento construtivo num molde. Recorrendo ao molde, com processos de fabrico como a moldagem por injeção, é possível reproduzir o

objeto. Seguindo um princípio semelhante, se os dados geométricos de um determinado objeto forem guardados, quer no formato STL quer no formato do programa BIM utilizado, será sempre possível a qualquer altura reproduzir o mesmo elemento, sem o desgaste que um molde poderá apresentar ao longo dos anos e sem ocupar o espaço físico que os moldes ocupam.

A criação de um armazém virtual de elementos construtivos poderá ser especialmente útil em obras de restauração. A partir do armazenamento dos dados geométricos dos vários objetos, estes podem ser replicados diretamente com recurso a técnicas de impressão 3D, ou indiretamente ao imprimir um molde e reproduzir o elemento pelos métodos tradicionais (moldagem por injeção ou outro). Em qualquer dos modos, o principal objetivo é poder armazenar toda a informação geométrica de modo eficaz, sem degradação, nem volume físico.

5.2.3. Criação de Biblioteca Virtual BIM-3DP

A criação de uma biblioteca virtual assemelha-se ao armazém virtual abordado no ponto anterior. No entanto, a biblioteca destina-se à criação de um catálogo de elementos BIM devidamente anexados a um ficheiro no formato STL que se destina à impressão expedita de elementos isolados. Este método visa simplificar a impressão de modelos, ao desintegrar o modelo por peças automaticamente alteradas e preparadas para a impressão.

O objetivo deste trabalho futuro está em agilizar o processo de impressão de elementos transversais a vários projetos que possam ser impressos. Exemplos deste tipo de objetos são elementos de mobiliário, de vegetação, equipamentos de cozinha/quarto de banho. Este tipo de elementos seria processado de acordo com os princípios referidos neste documento, analisado quanto às suas dimensões, unido e exportado sob o formato STL. O ficheiro resultante ficaria, então, anexado à correspondente família de elementos BIM, e em todos os projetos em que a sua utilização fosse necessária, este seria automaticamente ajustado à escala de impressão.

Para além dos tipos de elementos suprarreferidos, a impressão de elementos previamente preparados com estruturas de fixação poderia ser importante para a impressão de elementos pré-fabricados *standard* com uma presença recorrente em vários projetos. Assim, o elemento teria as estruturas de encaixe e os demais processos preparatórios previamente processados que seriam compatíveis com outros elementos pré-fabricados a imprimir. Este processo funcionaria um pouco à semelhança do "*Lego*", em que peças *standard* reutilizadas várias vezes são compatíveis a partir de estruturas de fixação previamente aplicadas. Um exemplo pratico poderia ser uma viga metálica, que uma vez selecionada a opção de impressão 3D, iria gerar automaticamente um fixador no local onde esta se encontra posicionada. Ao mesmo tempo, este elemento seria removido do modelo de impressão e seria processado à parte, podendo inclusive ser reutilizado noutros projetos.

Com recurso a este tipo de catálogo de elementos, a impressão seria útil na produção de modelos assembláveis, de preparação rápida e que poderiam ser interessantes na demonstração do processo construtivo, por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. O que é impressão 3D? (Disponível em https://www.autodesk.com.br/solutions/3d-printing). Acedido em 6 de Março de 2019.

[2]. Berman, B., *3-D printing: The new industrial revolution.* Business Horizons, Vol: 55, nº 2, 2012/03/01/, p. 155-162.

[3]. Charles, H., *The Birth of 3D Printing AU - Hull, Charles W.* Research-Technology Management, Vol: 58, nº 6, 2015/11/01, p. 25-30.

[4]. Wohlers, T. and T. Gornet, *History of additive manufacturing.* Wohlers Report 2016.

[5]. Prince, D., *3D Printing: An Industrial Revolution AU - Prince, J. Dale.* Journal of Electronic Resources in Medical Libraries, Vol: 11, nº 1, 2014/01/01, p. 39-45.

[6]. Prater, T.J., et al., *Summary Report on Phase I Results From the 3D Printing in Zero-G Technology Demonstration Mission.* Vol: 1, nº NASA/TP—2016–219101, July, 2016, p. 107.

[7]. Rosochowski, A. and A. Matuszak, *Rapid tooling: the state of the art.* Journal of Materials Processing Technology, Vol: 106, nº 1, 2000/10/31/, p. 191-198.

[8]. Yang, L., et al. *Additive manufacturing of metals the technology, materials, design and production*. Springer, Cham, 2017.

[9]. What is 3D printing? The Definitive Guide (Disponível em https://www.3dhubs.com/get/3d-printing-guide/). Acedido em 25 de Fevereiro de 2019.

[10]. Gibson, I., D. Rosen, and B. Stucker. *Vat Photopolymerization Processes*. In I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, p. 63-106, I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, New York, NY, 2015.

[11]. 3D Printing vs. CNC machining (Disponível em https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-vs-cnc-machining). Acedido em 29 de Maio de 2019.

[12]. ISO/ASTM - 52900:2015. Disponível em https://www.iso.org/standard/69669.html. ISBN: ISBN.2015.

[13]. Lee, J.-Y., J. An, and C.K. Chua, *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials.* Applied Materials Today, Vol: 7, nº 2017/06/01/, p. 120-133.

[14]. 3D Printing Processes - Vat Photo polymerisation (Disponível em https://www.engineersgarage.com/articles/3d-printing-processes-vat-photo-polymerisation).

[15]. Chua, C.K., K.F. Leong, and C.S. Lim. *Rapid prototyping: Principles and applications, third edition*. 2010.

[16]. (Disponível em https://www.3dsystems.com/3d-printers/prox-950). Acedido em 28 de Fevereiro de 2019.

[17]. Perfactory P4K (Disponível em https://envisiontec.com/wp-content/uploads/2018/11/2018-P4K-Series.pdf). Acedido em 28 de Fevereiro de 2019.

[18]. Ambrosi, A. and M. Pumera, *3D-printing technologies for electrochemical applications.* Chemical Society Reviews, Vol: 45, nº 10, 2740-2755.

[19]. Stansbury, J.W. and M.J. Idacavage, *3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities.* Dental Materials, Vol: 32, nº 1, 2016/01/01/, p. 54-64.

[20]. M2 Printer (Disponível em www.carbon3d.com/hardware/). Acedido em 29 de Maio de 2019.

[21]. Gibson, I., D.W. Rosen, and B. Stucker. *Extrusion-Based Systems*. In I. Gibson, D.W. Rosen, and B. Stucker Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, p. 160-186, I. Gibson, D.W. Rosen, and B. Stucker, Boston, MA, 2010.

[22]. About Additive Manufacturing - Material Extrusion (Disponível em https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/). Acedido em 29 de Maio de 2019.

[23]. The Original Prusa I3 MK3S 3D Printer (Disponível em https://www.prusa3d.com/original-prusa-i3-mk3/). Acedido em 30 de Maio de 2019.

[24]. Palette+ (Disponível em www.mosaicmfg.com/pages/technology). Acedido em 30 de Maio de 2019.

[25]. Panda, B., et al., *3D printing trends in building and construction industry: a review AU - Tay, Yi Wei Daniel.* Virtual and Physical Prototyping, Vol: 12, nº 3, 2017/07/03, p. 261-276.

[26]. Gibson, I., D. Rosen, and B. Stucker. *Material Jetting*. In I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, p. 175-203, I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, New York, NY, 2015.

[27]. Dickens, P., M. Gilbert, and M. Fahad, *Novel polymeric support materials for jetting based additive manufacturing processes.* Rapid Prototyping Journal, Vol: 19, nº 4, 2013/06/07, p. 230-239.

[28]. A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry (Disponível em https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-material-jetting-process_fig3_325876280). Acedido em 29 de Maio de 2019.

[29]. Stratasys Polyjet Technology (Disponível em http://stratasys.com/3d-printers/technology/polyjet-technology). Acedido em 17 de Agosto de 2013.

[30]. XJet & NanoParticle Jetting Technology (Disponível em https://xjet3d.com/wp-content/uploads/2018/04/Xjet_Marketing_brochure_A8-2.pdf). Acedido em 1 de Março de 2019.

[31]. CARMEL 1400 AM SYSTEM for CERAMIC (Disponível em https://xjet3d.com/wp-content/uploads/2018/12/Carmel-1400-Ceramics-print.pdf). Acedido em 28 de Fevereiro de 2019.

[32]. CARMEL 1400 AM SYSTEM for METAL (Disponível em https://xjet3d.com/wp-content/uploads/2018/12/Carmel-1400-Metal-print.pdf). Acedido em 28 de Fevereiro de 2019.

[33]. S300 Series High resolution 3D printers for jewelers (Disponível em www.solidscape.com/s300-series-3d-printer). Acedido em 30 de Maio de 2019.

[34]. Gibson, I., D. Rosen, and B. Stucker. *Binder Jetting*. In I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, p. 205-218, I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, New York, NY, 2015.

[35]. Binder Jetting (BJ) (Disponível em www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting). Acedido em 29 de Maio de 2019.

[36]. Gibson, I., D. Rosen, and B. Stucker. *Powder Bed Fusion Processes*. In I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, p. 107-145, I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, New York, NY, 2015.

[37]. Powder bed fusion - DMLS, SLS, SLM, MJF, EBM (Disponível em https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion). Acedido em 29 de Maio de 2019.

[38]. SLM 800 Selective Laser Melting Machine (Disponível em https://slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/150EN181102_03_SLM800_WEB.pdf). Acedido em 28 de Fevereiro de 2019.

[39]. Parthasarathy, J., et al., *Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM)*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Vol: 3, nº 3, 2010/04/01/, p. 249-259.

[40]. Welcome to Manufacturing Unbound (Disponível em http://www.arcam.com/wp-content/uploads/arcamebm-corp-brochure-fnlv3.pdf). Acedido em 1 de Março de 2019.

[41]. Gibson, I., D. Rosen, and B. Stucker. *Directed Energy Deposition Processes*. In I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, p. 245-268, I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, New York, NY, 2015.

[42]. Directed energy deposition - DED, LENS, EBAM (Disponível em https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion). Acedido em 29 de Maio de 2019.

[43]. LENS 850-R (Disponível em https://www.multistation.com/voy_content/uploads/sites/4/2017/09/lens_850-r_web_0716.pdf). Acedido em 28 de Fevereiro de 2019.

[44]. Vartanian, K., et al., *Powder Bed Fusion vs. Directed Energy Deposition Benchmark Study: Mid-size Part with Simple Geometry.*

[45]. Make Metal Parts Faster & Cheaper Than Ever with Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) Systems or Services. (Disponível em http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology). Acedido em 28 de Fevereiro de 2019.

[46]. Gibson, I., D. Rosen, and B. Stucker. *Sheet Lamination Processes*. In I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, p. 219-244, I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, New York, NY, 2015.

[47]. Sheet Lamination Explained (Disponível em 3DPIndustry.com).

[48]. About Additive Manufacturing (Disponível em https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/). Acedido em 30 de Maio de 2019.

[49]. Manufacturing Processes Explained (Disponível em www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing). Acedido em 30 de Maio de 2019.

[50]. Moai - Affordable Laser SLA Printer (Disponível em https://peopoly.net/products/moai). Acedido em 30 de Maio de 2019.

[51]. Armadillo White (Disponível em www.concr3de.com/printers/armadillowhite). Acedido em 30 de Maio de 2019 de 2019.

[52]. SINTERIT LISA PRO (Disponível em www.sinterit.com/wp-content/uploads/2014/05/LISA_PRO_Specification.pdf). Acedido em 30 de Maio de 2019.

[53]. LENS 150 additive manufacturing controlled atmosphere system (Disponível em https://www.optomec.com/wp-content/uploads/2018/11/LENS-150-AM-CA_WEB1118.pdf). Acedido em 30 de Maio de 2019.

[54]. Paper Puts the OMG in 3DP (Disponível em https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/mcortechnologies.com/wp-content/uploads/2014/10/MCOR-PrinterBrochureNEW-EU-single.pdf?fbclid=IwAR31eTXFKCpWTf1JuFVN7JfYgbVs5hSv6HoWj0U9Kkk5fDTttVjez8C2MSM). Acedido em 30 de Maio de 2019.

[55]. Griffey, J., *Absolutely fab-ulous.* Library Technology Reports, Vol: 48, nº 2012/04//

//, p. 21+.

[56]. Howard, J., *The 100,000 th thing on thingiverse.* MakerBot Newsletter.

[57]. Mai, J., et al., *Customized production based on distributed 3D printing services in cloud manufacturing.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol: 84, nº 1, 2016/04/01, p. 71-83.

[58]. Implementing 3D Printing: In-house or Outsource? (Disponível em https://www.stratasysdirect.com/manufacturing-services/3d-printing/3d-printing-service-vs-buying-3d-printer). Acedido em 19 de Fevereiro de 2019 de 2019.

[59]. Robertson, D. - 3D printing - Outsource, or print in-house? Disponível em https://ultimaker.com/en/blog/52677-3d-printing-outsource-or-print-in-house. ISBN: ISBN.2018.

[60]. Oropallo, W. and L.A. Piegl, *Ten challenges in 3D printing.* Engineering with Computers, Vol: 32, nº 1, 2016/01/01, p. 135-148.

[61]. Campbell, T., et al. *Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*. 2011.

[62]. Ahn, D., H. Kim, and S. Lee, *Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol: 47, nº 3, 2007/03/01/, p. 593-606.

[63]. Gardan, N. and A. Schneider, *Topological optimization of internal patterns and support in additive manufacturing.* Journal of Manufacturing Systems, Vol: 37, nº 2015/10/01/, p. 417-425.

[64]. Gibson, I., D. Rosen, and B. Stucker. *Generalized Additive Manufacturing Process Chain*. In I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, p. 43-61, I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, New York, NY, 2015.

[65]. Two concentric circles, representig a CAD model of a doughtnut shape, and a series of triangles approximating the doughnut, representing how STL modeling works. (Disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format)#/media/File:The_differences_between_CAD_and_STL_Models.svg). Acedido em 30 de Maio de 2019.

[66]. Cain, P. - Selecting the optimal shell and infill parameters for FDM 3D Printing. 3D Hubs: Disponível em https://www.3dhubs.com/knowledge-base/selecting-optimal-shell-and-infill-parameters-fdm-3d-printing.

[67]. Dutta, D., P. Kulkarni, and A. Marsan, *A review of process planning techniques in layered manufacturing.* Rapid Prototyping Journal, Vol: 6, nº 1, 2000/03/01, p. 18-35.

[68]. Horvath, J. *Driving Your Printer: G-code*. In J. Horvath Mastering 3D Printing, p. 65-76, J. Horvath, Berkeley, CA, 2014.

[69]. Finishing process: bond, seal and beauty 3D printed parts. (Disponível em http://www.stratasys.com/solutions-applications/finishing-processes).

[70]. Armstrong, C. - Post processing for FDM printed parts. 3D Hubs: Disponível em https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts.

[71]. What is the difference between Revit and AutoCAD? (Disponível em https://www.autodesk.com/solutions/revit-vs-autocad). Acedido em 26 de Fevereiro de 2019.

[72]. What is ARCHICAD (Disponível em https://helpcenter.graphisoft.com/knowledgebase/86314/). Acedido em 26 de Fevereiro de 2019.

[73]. Mengana, S. and T. Mousiadis - Parametric BIM : Energy Performance Analysis Using Dynamo for Revit. Disponível em http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-199637. ISBN: ISBN.2016.

[74]. Explore Dynamo (Disponível em www.dynamobim.org). Acedido em 31 de Maio de 2019.

[75]. Mirtschin, J., *Visual Programming in Architecture: Should Architects Be Trained As Programmers?* CAAD Futures.

[76]. Wu, P., J. Wang, and X. Wang, *A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry.* Automation in Construction, Vol: 68, nº 2016/08/01/, p. 21-31.

[77]. Kvan, T., I. Gibson, and L.W. Ming, *Rapid Prototyping for Architectural Models.* Rapid Prototyping Journal, Vol: 8, nº 2, 92-95.

[78]. Xia, M., B. Nematollahi, and J. Sanjayan, *Printability, accuracy and strength of geopolymer made using powder-based 3D printing for construction applications.* Automation in Construction, Vol: 101, nº 2019/05/01/, p. 179-189.

[79]. Kreiger, M.A., et al. - The current state of 3D printing for use in construction. Ames. Iowa: ISBN: ISBN.2015.

[80]. Lim, S., et al., *Developments in construction-scale additive manufacturing processes.* Automation in Construction, Vol: 21, nº 2012/01/01/, p. 262-268.

[81]. de Beer, N., et al., *Investigating the achievable accuracy of three dimensional printing.* Rapid Prototyping Journal, Vol: 12, nº 1, 2006/01/01, p. 42-52.

[82]. Lee, P.-H., et al., *Review: Dimensional Accuracy in Additive Manufacturing Processes.* 45806, V001T04A045.

[83]. Cesaretti, G., et al., *Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology.* Acta Astronautica, Vol: 93, nº 2014/01/01/, p. 430-450.

[84]. Rael, R. and V.S. Fratello, *Developing Concrete Polymer Building Components for 3D Printing, ACADIA.* 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, Banff.

[85]. Amaury Le Néel, T., P. Mognol, and J. Hascoet. *A review on additive manufacturing of sand molds by binder jetting and selective laser sintering*. 2018.

[86]. 3D Printing on the Moon and underwater | D-Shape Enterprises (Disponível em https://www.youtube.com/watch?v=WLSX9kl9szc). Acedido em 31 de Maio de 2019.

[87]. Khoshnevis, B., et al., *Experimental investigation of contour crafting using ceramics materials.* Rapid Prototyping Journal Vol: 8 nº 3, 32-41.

[88]. Khoshnevis, B., et al., *Crafting large prototypes.* IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol: 8, nº 3, 33-42.

[89]. Khoshnevis, D. - Contour Crafting Inventor Dr. Khoshnevis: Widespread 3D Printed Homes in 5 Years, High-Rises in 10 Years. 3Dprint.com: [Consult. 31 de Maio de 2019], Disponível em www.3dprint.com/53437/contour-crafting-dr-khoshnevis. ISBN: ISBN.2015.

[90]. Bak, D., *Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter.* Assembly Automation, Vol: 23, nº 4, 2003/12/01, p. 340-345.

[91]. Ding, L., R. Wei, and H. Che, *Development of a BIM-based Automated Construction System.* Procedia Engineering, Vol: 85, nº 2014/01/01/, p. 123-131.

[92]. Hwang, D. and B. Khoshnevis. *Concrete Wall Fabrication by Contour Crafting*. 2004.

[93]. Kietzmann, J., L. Pitt, and P. Berthon, *Disruptions, decisions, and destinations: Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing.* Business Horizons, Vol: 58, nº 2, 2015/03/01/, p. 209-215.

[94]. Liang, F.F., R.W. Liang, and X.H. Xiang, *Analysis of Effect Factors about the Ground Settlement during Foundation Pit Excavation.* Advanced Materials Research, Vol: 1065-1069, nº 7-10.

[95]. The 3D Printed Office of the Future (Disponível em https://www.asme.org/engineering-topics/articles/manufacturing-design/3d-printed-office-the-future).

[96]. Sakin, M. and Y.C. Kiroglu, *3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM.* Energy Procedia, Vol: 134, nº 2017/10/01/, p. 702-711.

[97]. Borrmann, A., et al. *Building Information Modeling: Why? What? How?* In A. Borrmann, et al. Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice, p. 1-24, A. Borrmann, et al., Cham, 2018.

[98]. Bonenberg, W., X. Wei, and M. Zhou - BIM in Prefabrication and Modular Building.In Advances in Human Factors, Sustainable Urban Planning and Infrastructure. Cham, Springer International Publishing, 2019, p. 100-110,

[99]. Andre - 25 Free Dual Extruder Multicolor 3D prints you can make today. 3ders.org: 3ders, Disponível em https://www.3ders.org/articles/20160310-top-30-best-dual-extruder-multicolor-3d-prints.html?fbclid=IwAR1Pvro5n0JosWRigOih919N-7i7UTKXAipUVgAf49N2xxdxfCrLCSYuMCs. ISBN: ISBN.2016.

ANEXO

A: SCRIPTS DE DYNAMO

1.1. SELEÇÃO E UNIÃO DO MODELO

1.1.1. VERIFICAÇÃO DIMENSIONAL DOS ELEMENTOS

O processo de verificação dimensional está desenvolvido num *script* à parte dos restantes. A sua utilização deverá anteceder todos os procedimentos a aplicar ao modelo e deverá ocorrer ainda na fase de seleção dos elementos. O seu funcionamento tira proveito da criação de parâmetros de projeto no Revit para a atribuição de valores indicativos da capacidade de impressão de cada elemento. A linha de programação encontra-se dividida tal como demonstrado na imagem que se segue (Figura 102).

Numa primeira fase são importados todos os elementos do projeto. De seguida, são listados somente os elementos sólidos correspondentes, seguido da verificação da dimensão relativa ao comprimento e ao volume de cada um dos elementos. Por fim, de acordo com os resultados obtidos é atribuído um valor do tipo *Yes*/*No* ao parâmetro correspondente.

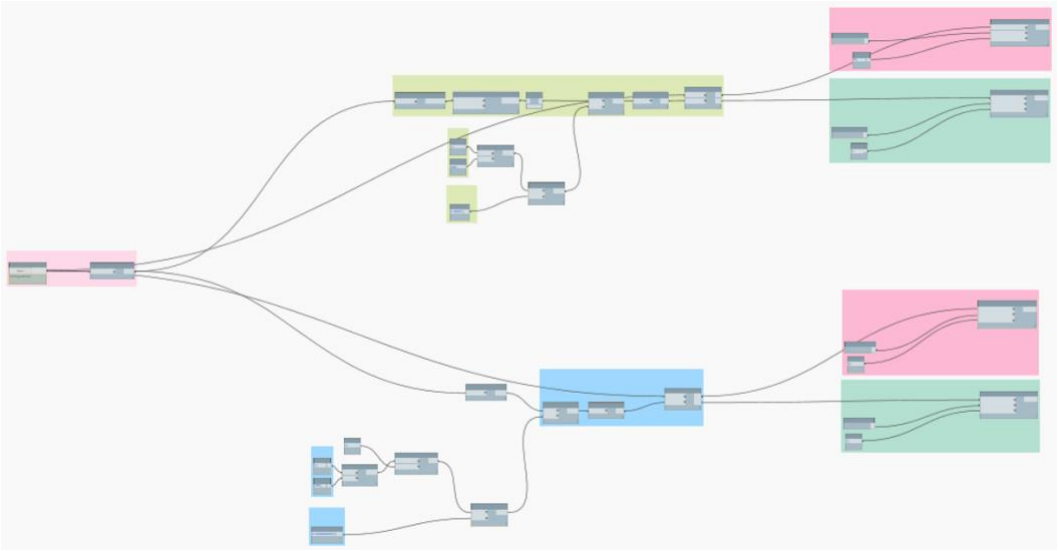


Figura 102 – Panorama geral do *script*

A primeira etapa do *script* processa a importação de todos os elementos do projeto e da respetiva geometria. Nesta fase poderão ser utilizadas várias combinações diferentes, conforme o tipo de modelo utilizado. A combinação mais transversal aos diferentes tipos de modelo apenas requer a seleção dos elementos no Revit, que são importados para o Dynamo através de "*Select Model Elements*". Na figura

seguinte (Figura 103) para além do nó mencionado está também demonstrado o processo de seleção das geometrias sólidas de cada um dos elementos, "*Element.Solids*".

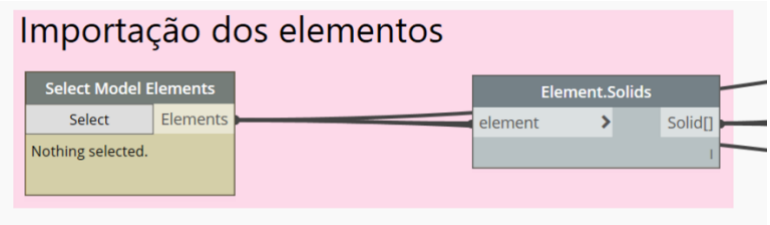


Figura 103 – Importação dos elementos por seleção manual.

Outro exemplo de importação pode ser observado na Figura 104. Esta combinação tem a vantagem de ser totalmente automática. No entanto requer que todos os elementos estejam devidamente associados a um nível.

Com o auxílio do nó de seleção de todos os elementos por categoria, "*All Elements of Category*", é importada uma lista de todos os níveis existentes no projeto. A partir da ferramenta "*All Elements at Level*" são importados todos os elementos do projeto para cada um dos níveis existentes no projeto, listados previamente. Por sua vez, esta lista dá origem a uma lista com as geometrias geradas a partir de cada elemento.

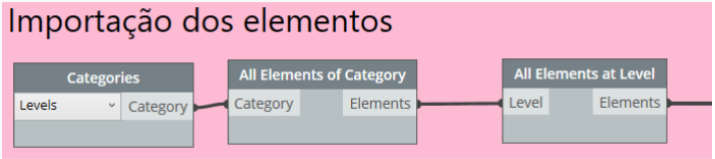


Figura 104 – Importação dos elementos do projeto.

De seguida, procede-se à verificação dimensional dos objetos selecionados (Figura 105). A partir do nó "*BoundingBox.ByGeometry*" é gerada uma caixa de contorno para cada um dos sólidos, com as dimensões máximas de largura, de comprimento e de altura do objeto correspondente. Com a utilização de "*BoundingBox.Dimensions – Zhukoven – Alterado*" é criada uma sublista com as dimensões mencionadas para cada caixa de contorno. Em simultâneo, pode ser definida a escala a utilizar na impressão e a espessura mínima (em qualquer direção) a utilizar na impressão. No caso de a espessura de camada ser maior que a espessura mínima de parede, deverá ser sempre utilizado o maior valor. Através de uma operação de multiplicação, este valor é convertido para as unidades do projeto e comparado, numa relação do tipo "menor que" a cada uma das dimensões das diferentes caixas de contorno. Conforme a relação, o Dynamo lista o resultado "*True*" ou "*False*", correspondendo o primeiro às dimensões menores que a espessura mínima especificada. Com recurso ao nó "*ListAnyTrue*" é também atribuído o valor "*True*" ou "*False*" consoante cada uma das caixas de contorno tenha pelo menos um valor do tipo "*True*" ou não, respetivamente. Por fim, a lista original de seleção dos elementos é filtrada, com a criação de duas listas distintas, correspondentes aos elementos com valor "*True*" ou "*False*" no passo anterior. Para cada uma das listas, será atribuído um valor oposto no parâmetro criado.

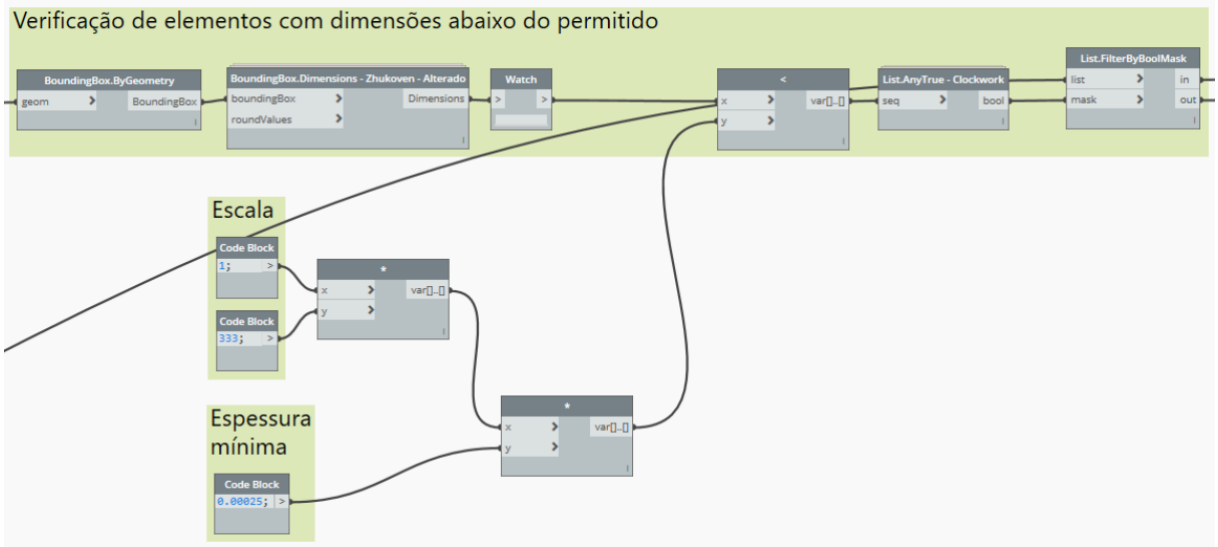


Figura 105 – Especificação dos requisitos de impressão e verificação das dimensões dos elementos do projeto.

Analogamente à verificação das dimensões dos elementos, a sua verificação de volume segue uma linha de processamento semelhante (Figura 106), apenas se distinguindo no cálculo dos volumes, que é direto a partir da geometria dos elementos selecionados.

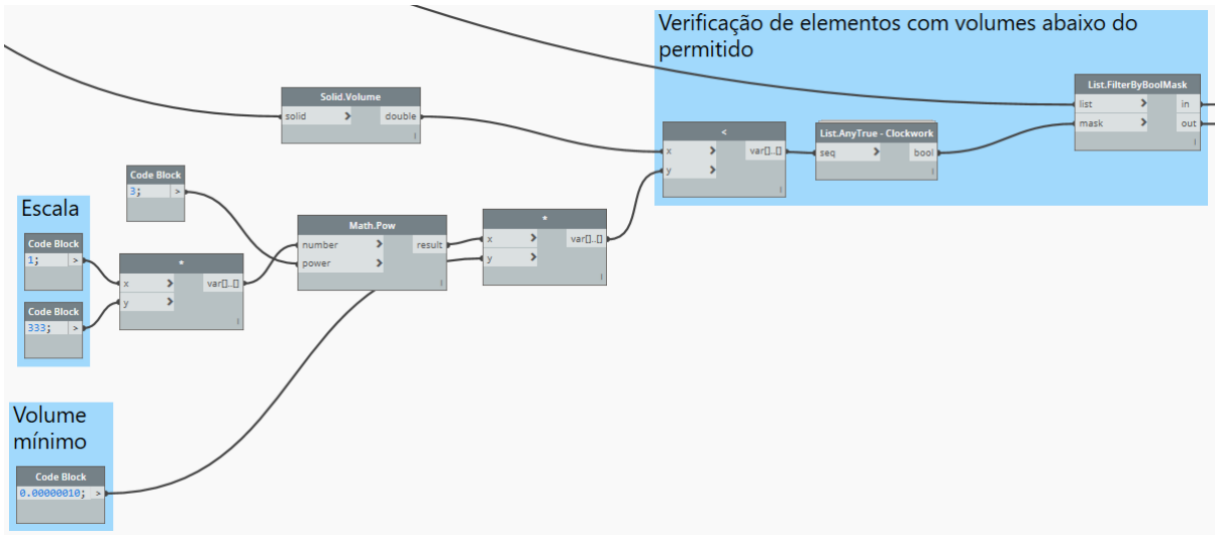


Figura 106 – Verificação da capacidade de imprimir o volume.

O último passo do *script* passa pela atribuição de um valor aos parâmetros do Revit, previamente criados, relativo à análise em curso (Figura 107). Para tal, atribui-se o valor "1 – *Yes*" ou "0 – *No*", para os elementos que sejam aprovados ou reprovados na verificação do parâmetro correspondente.

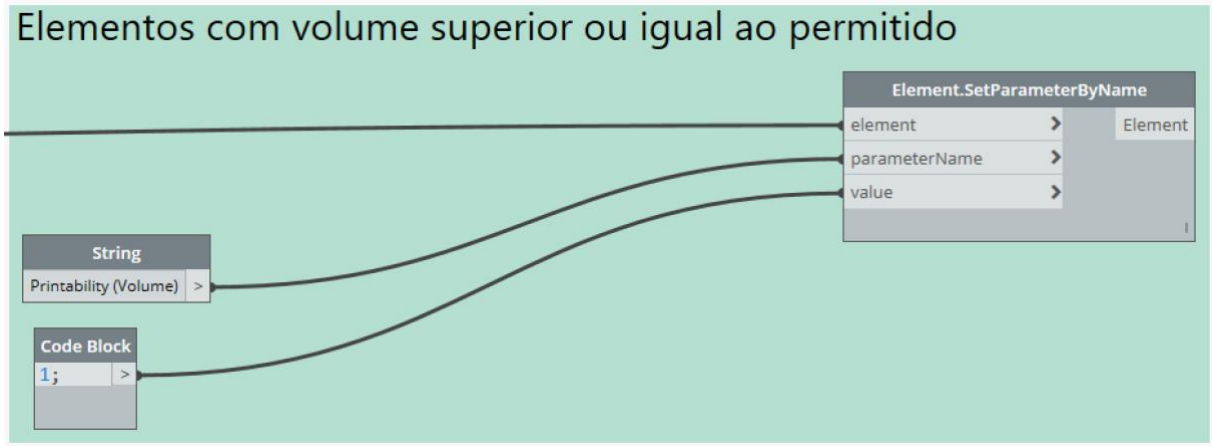


Figura 107 - Atribuição de valor positivo no parâmetro de verificação de volume do elemento.

Na Figura 108 é possível ver o mesmo raciocínio da Figura 107 aplicado no sentido negativo. As duas apenas diferem no nó de descrição do nome do parâmetro e no de atribuição de valor ao parâmetro.

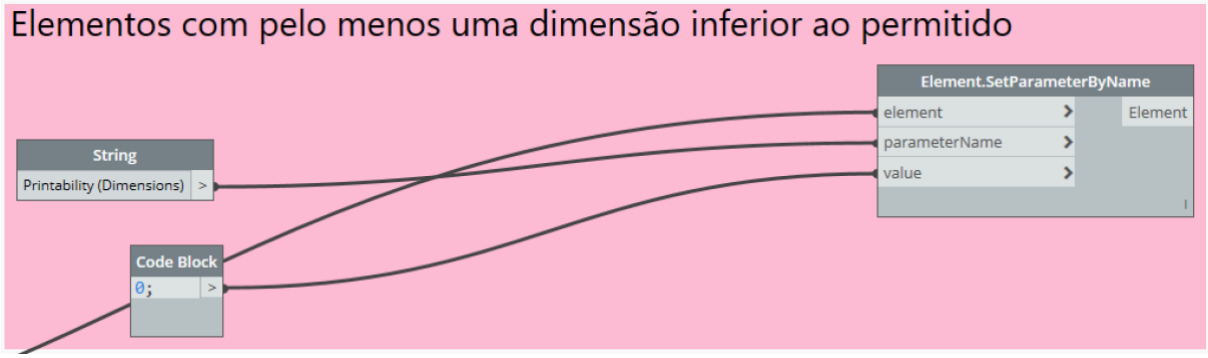


Figura 108 - Atribuição de valor negativo no parâmetro de verificação das dimensões do elemento.

1.1.2. Análise de Integridade – União do modelo

O *script* que se segue (Figura 109), funde todos os elementos sólidos entre si, resultando num sólido apenas. Para tal este passa por três passos: importação da geometria; seleção exclusiva dos elementos sólidos e união dos elementos. Os dois últimos passos são constantes, independentemente do tipo de importação utilizada no modelo a unir.

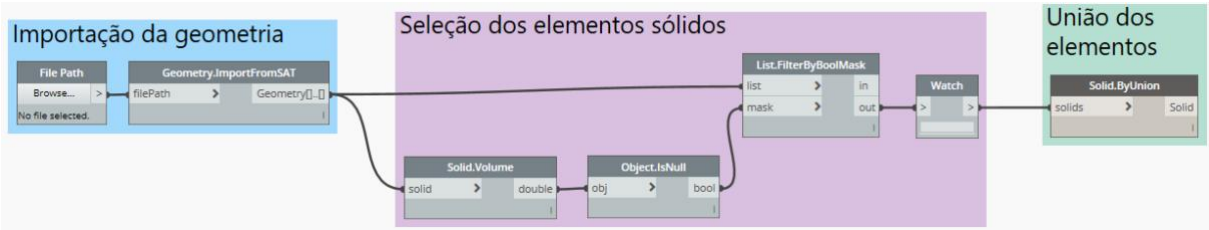


Figura 109 – Panorama geral do *script* de união.

De acordo com o referido no documento principal, a importação pode ser processada de várias modos, oscilando entre métodos puramente geometricos e métodos de importação direta de elementos Revit. Em cada um dos casos, existem inúmeras alternativas de combinações de nós que permitem importar a geometria de um projeto para o Dynamo.

Na Figura 110, está demonstrada a importação da geometria a partir da criação de uma listagem de categorias a importar. Tal como é possivel observar, este método implica a importação individualizada de cada categoria.

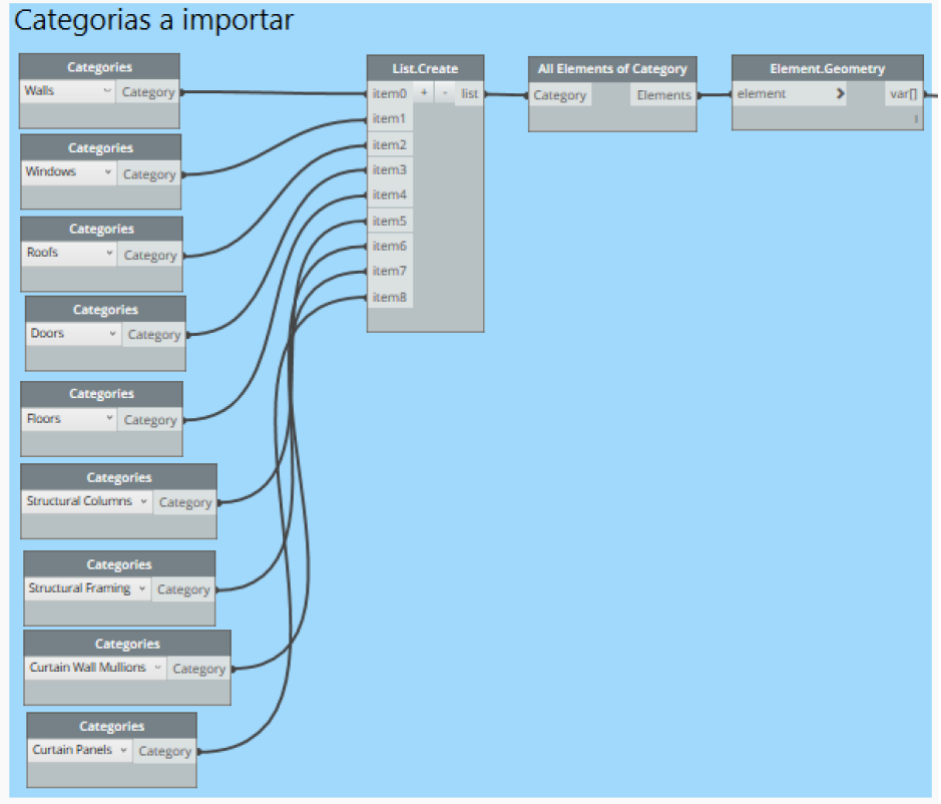


Figura 110 – Importação por categorias Revit.

Na imagem que se segue (Figura 111) está demonstrada a sequência de nós que a importação de geometrias SAT implica. Para o efeito apenas é necessário indicar a diretoria do ficheiro CAD a importar e de seguida, importar com o auxílio do nó "*Geometry.ImportFromSAT*", no formato SAT, exclusivamente.

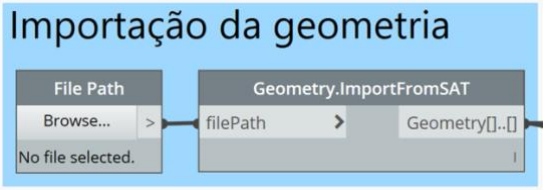


Figura 111 – Importação de modelo no formato geométrico.

No passo de seleção dos elementos sólidos é feita a filtragem dos elementos sólidos importados por qualquer um dos métodos utilizados. Após a sua filtragem, são selecionados apenas os elementos cujo volume é diferente de "Nulo" (Figura 112).

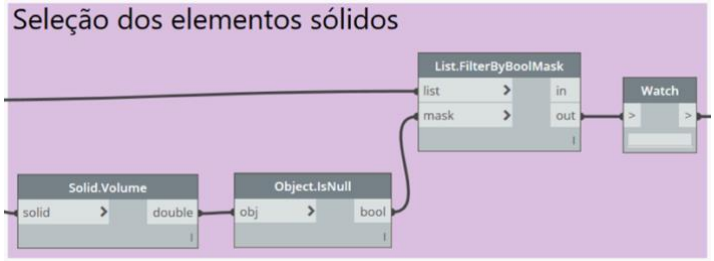


Figura 112 – Seleção dos elementos sólidos.

Por fim, a partir da lista com todos os sólidos selecionados, com recurso a "*Solid.ByUnion*", todos os elementos são fundidos num sólido apenas (Figura 113). É importante referir, que a função "*Solid.ByUnion*" não se revela 100% eficaz na fusão de geometrias, podendo por vezes falhar por erro do próprio programa.

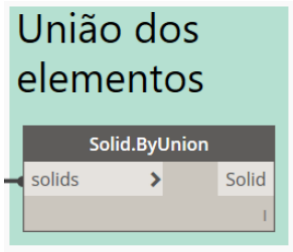


Figura 113 – União dos sólidos.

1.2. Modelo Maciço

O *script* de massificação de um modelo utiliza os mesmos três passos do *script* de união de um modelo (Figura 114). A principal alteração no processo de massificação de um modelo surge ainda na etapa de modelação do mesmo. Deste modo, a linha de processamento do modelo no Dynamo mantém-se inalterada.

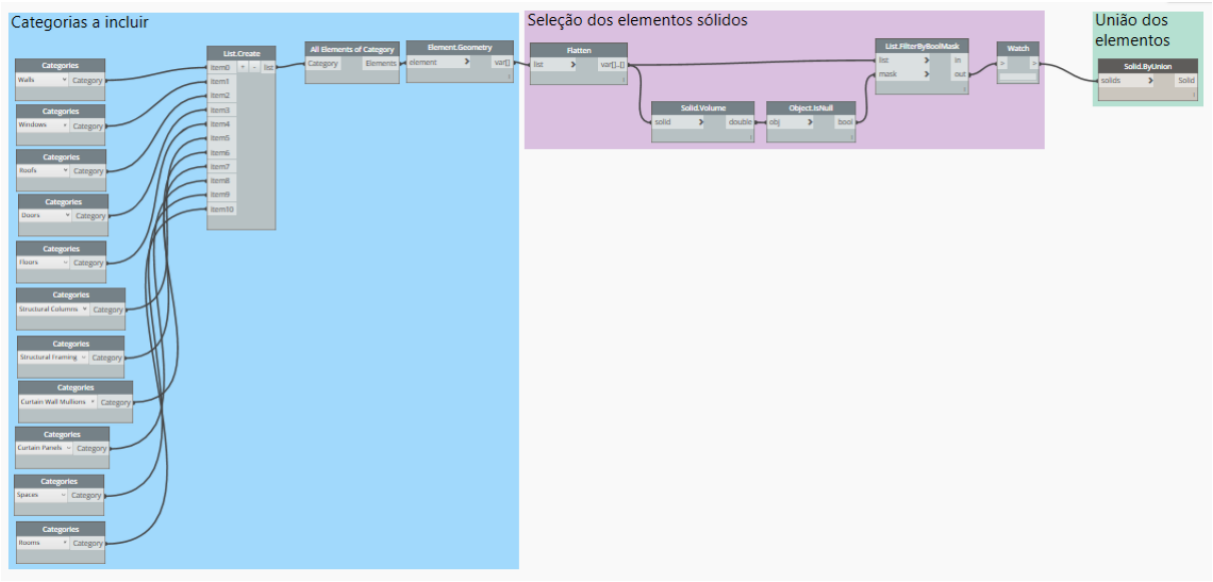


Figura 114 – Panorama geral de massificação de um modelo.

A principal alteração que surge neste *script* está na adição da importação das categorias correspondentes a "*Room*" e/ou "*Spaces*" (Figura 115). O método de importação destas categorias deverá ser sempre seguindo o raciocínio de importação de categorias, mesmo no caso de o restante modelo estar no formato geométrico.

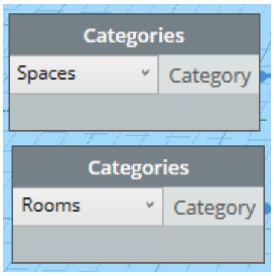


Figura 115 – Importação de categorias Revit.

O resto do processo desenrola-se tal como descrito para o *script* de união de modelos (Figura 116).

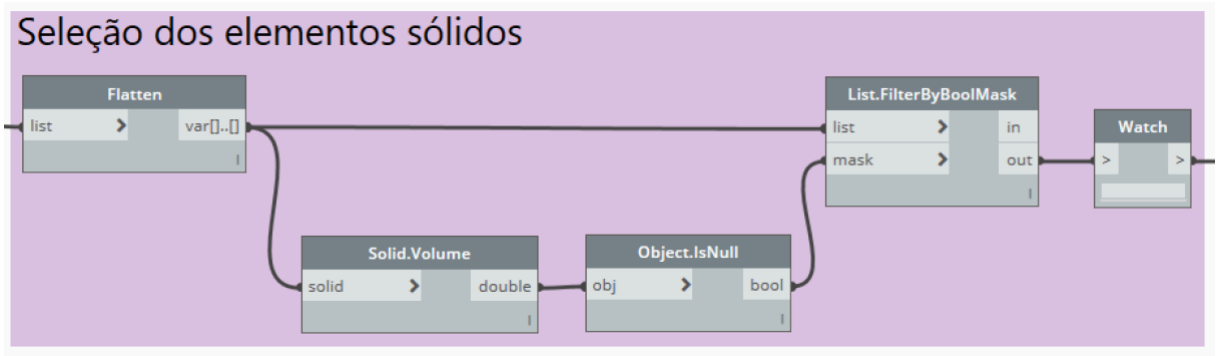


Figura 116 – Seleção dos elementos sólidos.

Por fim, o último passo une todos os elementos sólidos resultantes através do nó "*Solid.ByUnion*" demonstrado na Figura 113.

1.3. Divisão do Modelo

1.3.1. Por Piso

Comparativamente aos processos anteriormente descritos, o princípio de funcionamento base mantém-se também no processo de divisão de um modelo (Figura 117). No entanto, ao longo do *script* são introduzidas algumas mudanças.

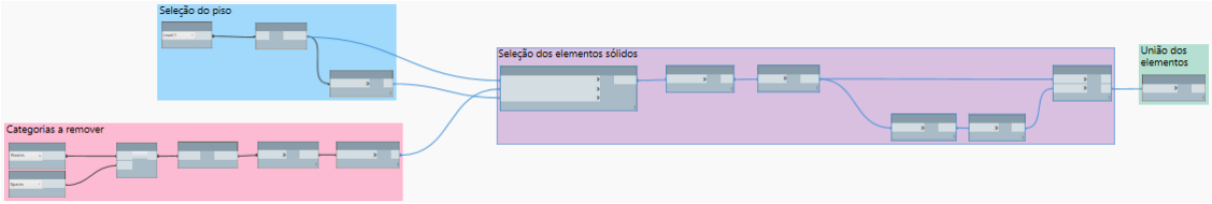


Figura 117 – Panorama geral do *script* de divisão por piso.

A primeira mudança ocorre ainda no passo de importação do modelo. Este método segue um princípio de importação direta a partir de elementos Revit. No entanto, ao contrário dos métodos até aqui

abordados, neste o processo inicia-se com a seleção do nível pretendido a partir de um nó denominado "*Levels*". Com o auxílio de "*All Elements at Level*", são importados para o Dynamo todos os elementos presentes no projeto Revit para o nível selecionado. Uma vez importados todos os elementos, estes dão origem à criação de uma lista com os parâmetros de identificação correspondentes (ID). A sequência de nós encontra-se demonstrado na Figura 118.

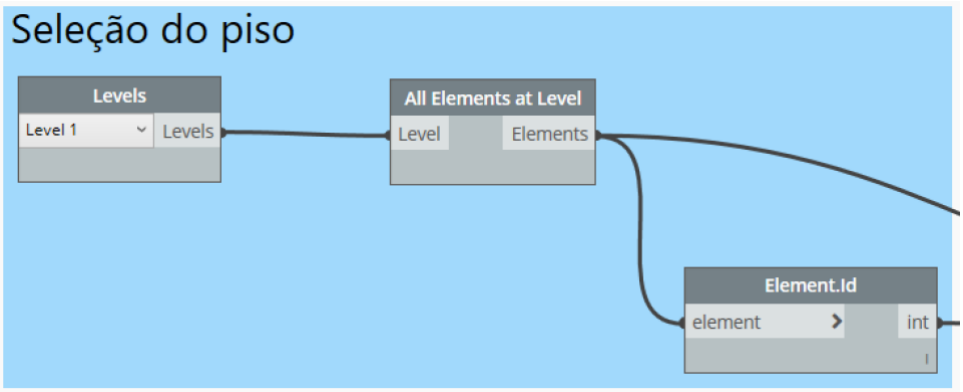


Figura 118 – Importação dos elementos por nível.

Em simultâneo no Dynamo é criada uma lista dos elementos a retirar com base na sua categoria. Na imagem que se segue (Figura 119) as categorias exemplificadas são as "*Rooms*" e "*Spaces*". O seu método de seleção é semelhante ao de importação de um projeto por categoria, começando pela listagem de todas as categorias, seguido da criação de uma nova lista com todos os elementos de todas as categorias selecionadas. De modo a evitar a fragmentação da lista em sublistas de elementos, utilizou-se a ferramenta "*Flatten*" que retira as divisões de sublistas na lista original, dando origem a uma lista que conjuga todos os elementos selecionados. Por fim, analogamente ao passo de importação, é criada uma lista com os parâmetros de identificação dos elementos a retirar.

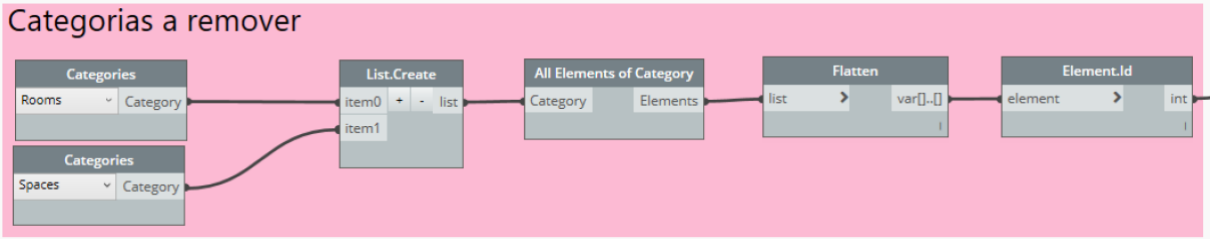


Figura 119 – Categorias a remover do processo de divisão.

O processo de seleção dos elementos sólidos também apresenta uma mudança, na fase inicial. A seleção dos elementos dá-se não só com base na sua geometria, removendo todos os elementos não sólidos, mas também na remoção de todos os elementos presentes na lista de importação que apresentem um parâmetro de identificação igual a qualquer um dos elementos listados nos elementos a remover. Para tal utilizou-se um nó denominado de "*Drop.Element.from.ID.List*" que remove todos os elementos de uma lista cujo parâmetro de identificação coincida com os parâmetros de identificação de uma segunda lista (Figura 120).

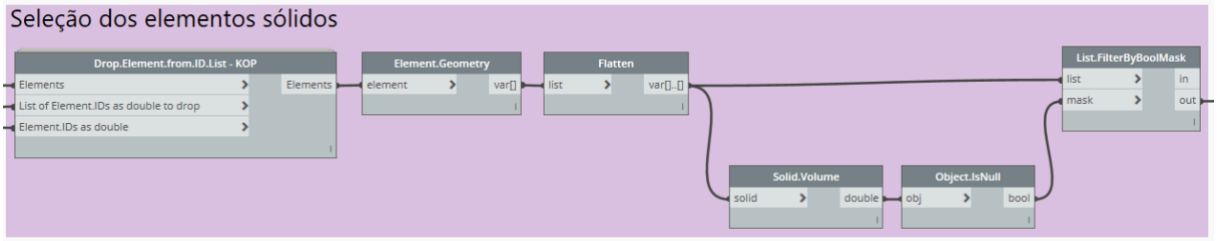


Figura 120 – Seleção dos elementos sólidos.

Por fim, o processo termina com a união dos elementos restantes da seleção, tal como nos *scripts* até aqui abordados, nomeadamente com a utilização de "*Solid.ByUnion*".

1.3.2. Por *Grid*

Na figura apresentada de seguida (Figura 121), é possível observar o panorama geral do *script*. Relativamente à divisão por piso, este *script* apresenta a possibilidade de dividir o modelo geometricamente segundo vários planos perpendiculares ao plano horizontal.

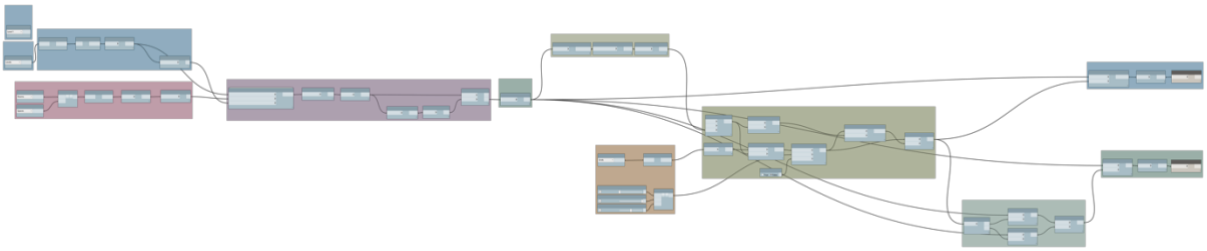


Figura 121 – Panorama geral do *script* de divisão por *grid*.

As três fases iniciais do *script* estão de acordo com o procedimento utilizado para a divisão por piso. Seleção de todos os elementos por piso, remoção de elementos das categorias selecionadas e a seleção dos elementos sólidos. Nestas fases, as alterações adicionadas são mínimas e não apresentam qualquer alteração ao seu funcionamento.

A única alteração a destacar está presente na Figura 122, com a adição da possibilidade de escolha de todos os níveis presentes no modelo ou de apenas um. Esta mudança permitirá obter modelos divididos pelos limites da *grid* completos ou divididos também por nível. Para processar essa mudança, o utilizador apenas terá de conectar o nó correspondente ao modelo completo "*Categories:Levels*" ou ao modelo dividido por nível "*Levels: Level 1*" (por exemplo) ao nó de importação da totalidade dos elementos por piso selecionados, "*All Elements of Category*".

Figura 122 – Seleção de nível e importação de elementos Revit.

Relativamente às categorias a remover do modelo a dividir, a sua linha de funcionamento permanece inalterada tal como se verifica na Figura 123.

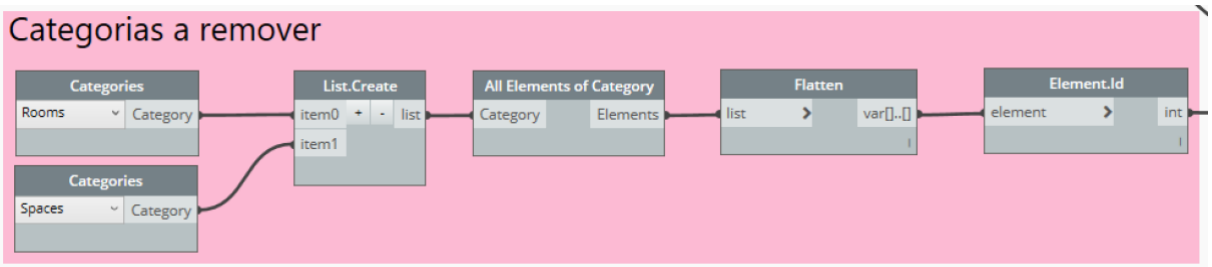


Figura 123 – Seleção dos elementos a remover do modelo.

À semelhança da seleção das categorias a remover, no processo de seleção dos elementos sólidos, não se verifica qualquer alteração do *script* (Figura 124).

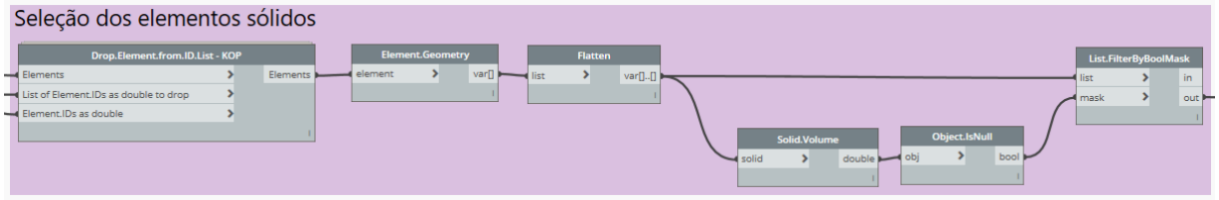


Figura 124 – Seleção dos elementos sólidos.

O procedimento de divisão por *grid* inicia-se a partir desta fase no *script*. De acordo com a Figura 125, a importação dos eixos *grid* dá-se a partir do nó de seleção de categorias. No entanto, por este método, o Dynamo importa todos os eixos *grid* existentes no projeto. Na necessidade de seleção de um conjunto limitado de *grids*, esta poderá ser executada com recurso a "*Select Model Elements*" que irá importar os elementos especificamente selecionados no Revit.

Uma vez importados os *grids*, a partir da introdução de um valor positivo, nulo, ou negativo, no "*Number Slider*", renomeado de "Direção Grid 1, 2, 3, etc" é definida a região a selecionar para cada um dos eixos. A partir dos dados inseridos, o Dynamo irá selecionar o lado positivo, a inexistência de seleção ou o lado negativo, respetivamente.

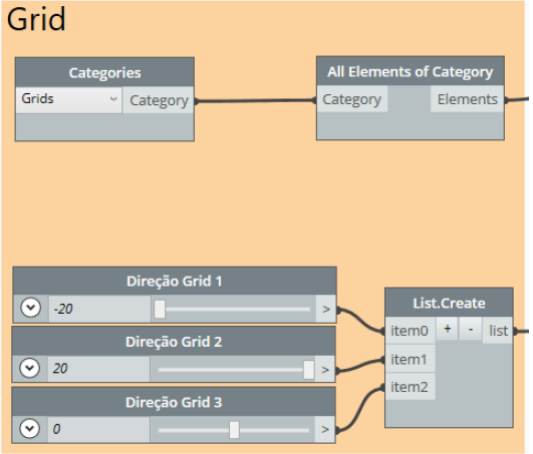


Figura 125 - Importação das *grid* e definição dos volumes de seleção.

Em simultâneo, com recurso à criação de uma caixa de contorno é retirada a altura do modelo processado após as fases iniciais do *script* (Figura 126). Este dado vai auxiliar a criação dos planos de divisão do modelo a partir das *grids*.

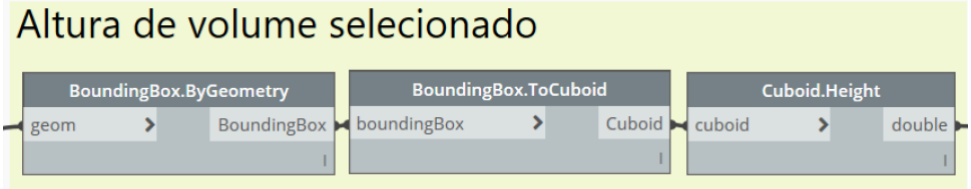


Figura 126 - Cálculo da altura do modelo processado.

Uma vez introduzidos todos os dados e processado o modelo a dividir, procede-se à criação dos volumes de seleção (Figura 127). A base do raciocino está abordado no documento principal. Relativamente ao *script*, este inicia-se pela criação de uma linha (*curve*) a partir de cada um dos eixos selecionados, com recurso a "*Grid.Curve*". A partir de um vetor com a direção (0,0, Z), sendo Z a altura do edifício obtida no passo anterior, é criado um plano definido pela linha criada e com a direção do vetor através de "*Curve.Extrude*".

De seguida, é criado um volume na direção introduzida anteriormente, com uma espessura à escolha do utilizador. "*Surface.Thicken*", nó utilizado neste passo, permite criar um volume em ambas as direções ou apenas numa direção. Por predefinição, esta opção está definida para criar apenas numa direção, no sentido positivo. Deste modo, consoante o utilizador defina uma direção positiva ou negativa no *grid*, o Dynamo irá criar um sólido apenas numa direção, no sentido positivo ou negativo. No caso de ser escolhida a opção 0, o Dynamo irá reconhecer esse valor como uma espessura de 0 unidades, pelo que não irá criar nenhum volume.

Por fim é criado um segundo volume por cada eixo selecionado, simétrico segundo no plano XY. Para tal, recorre-se a "*Geometry.Mirror*", que uma vez conectada à geometria a replicar e ao plano correspondente ao eixo de simetria processa o sólido. O plano XY é criado a partir de "*Plane.ByOriginNormal*" e do seu vetor normal que é coincidente com o vetor utilizado na criação do plano da *grid*. Este sólido é por último unido ao sólido de seleção original, passando a comportar-se com um único volume de seleção.

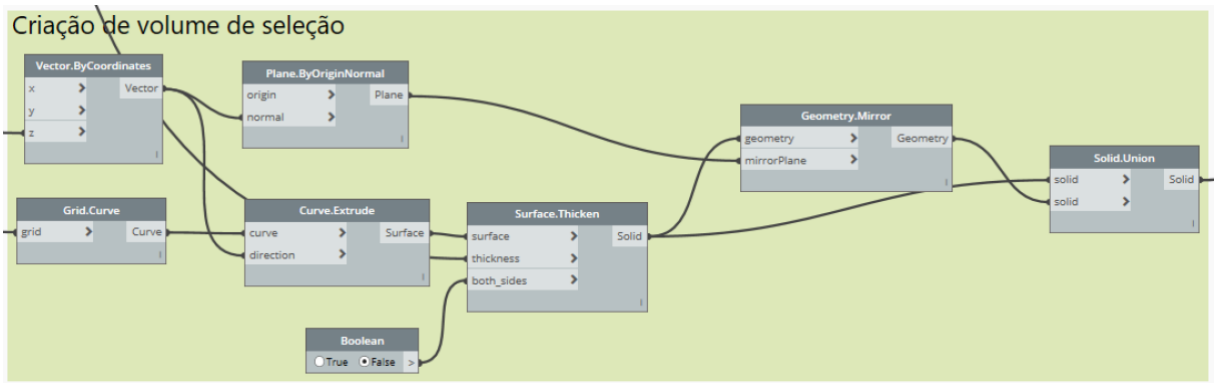


Figura 127 – Criação de volume de seleção.

No caso de o utilizador pretender a Reunião dos elementos selecionados com o modelo, o processo desenvolve-se diretamente do modelo processado e do volume de seleção, realizando uma intersecção entre os dois sólidos "*Geometry.Intersect*" (Figura 128). De acordo com o raciocínio abordado nos *scripts* iniciais, o processo finaliza-se com a união dos elementos sobrantes.

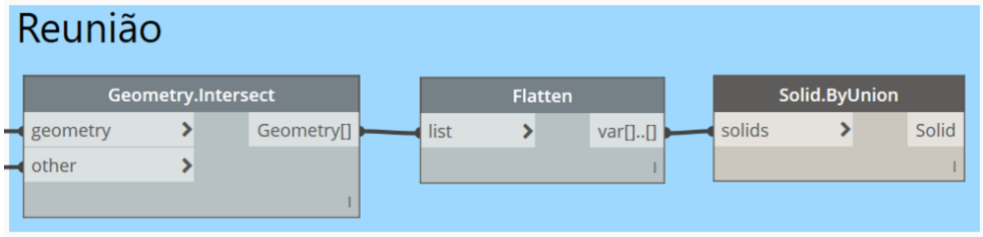


Figura 128 - Reunião de volume criado a partir de *grid*.

No caso de o utilizador pretender apenas a intersecção dos volumes criados a partir do *grid* com o modelo processado, a sequência de processamento está descrita na Figura 129. Para tal, os sólidos criados para cada um dos eixos da *grid* são separados e removidos ao modelo original através de "*Solid.Difference*" e unidos através de "*Solid.Union*". É importante referir que "*Solid.Union*"e "*Solid.ByUnion*" não representam o mesmo tipo de operação.

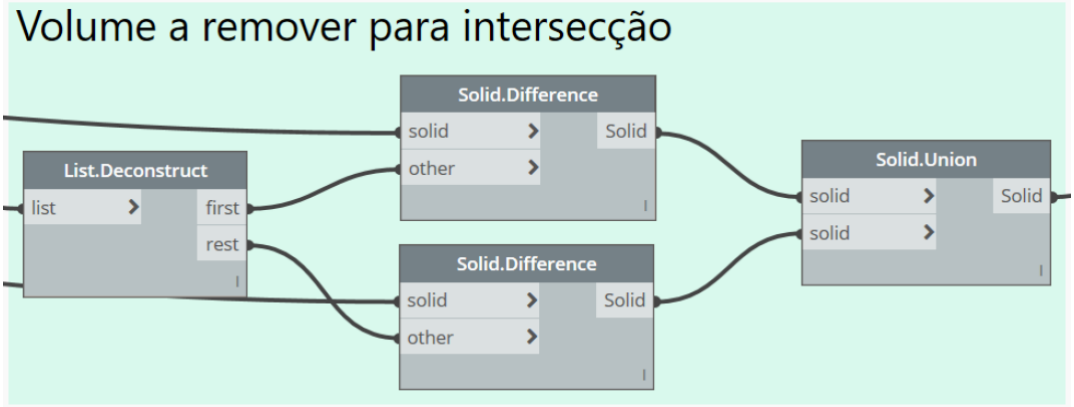


Figura 129 - Criação de volume a remover ao modelo original.

Por último, o volume a remover criado é eliminado do modelo processado, e os diferentes sólidos resultantes fundidos a partir de "*Solid.Difference*" e "*Solid.ByUnion*", respetivamente. Este passo do *script* está demonstrado na Figura 130.

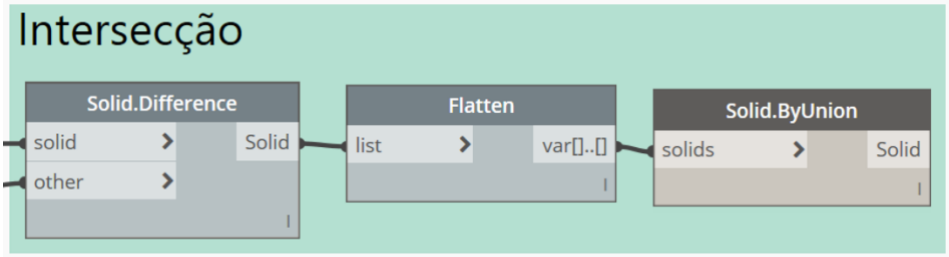


Figura 130 - Intersecção de modelo por divisão por *grid*.

1.3.3. Por *Scope Box*

O *script* de divisão por *Scope Box* está dividido em seis passos (Figura 131), que implicam a importação do modelo, a seleção dos elementos sólidos, a importação da *Scope Box*, a sua transformação num volume maciço, a intersecção do mesmo com o modelo e por fim a união de todos os elementos.

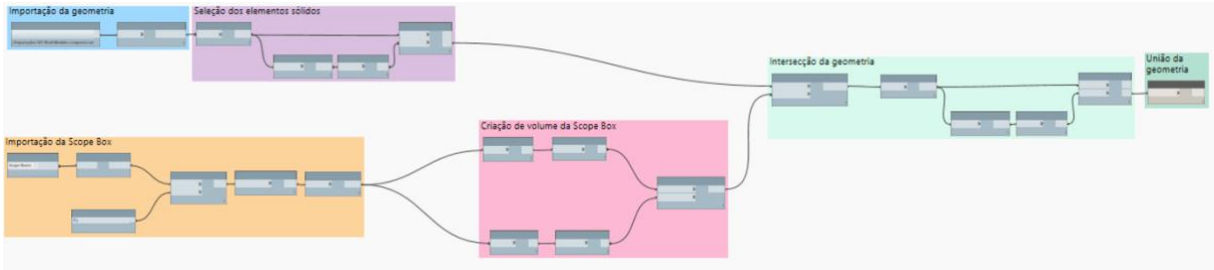


Figura 131 – Panorama geral do *script* de divisão por *Scope Box*.

O primeiro passo, implica a importação da geometria, que pode ser processada de acordo com os métodos geométricos ou de elementos Revit abordados para os *scripts* de união de modelos. Na imagem que se segue (Figura 132) está exemplificada a importação de modelo geométrico SAT.

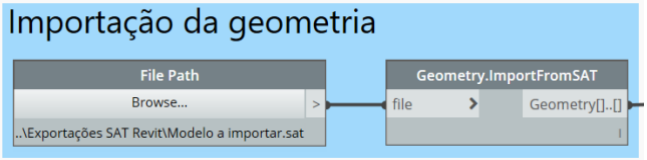


Figura 132 – Importação de modelo geométrico.

De seguida, analogamente aos processos de seleção de elementos sólidos, a linha de funcionamento do *script* verifica os volumes diferentes de "Nulo" e procede á remoção dos elementos não sólidos (Figura 133).

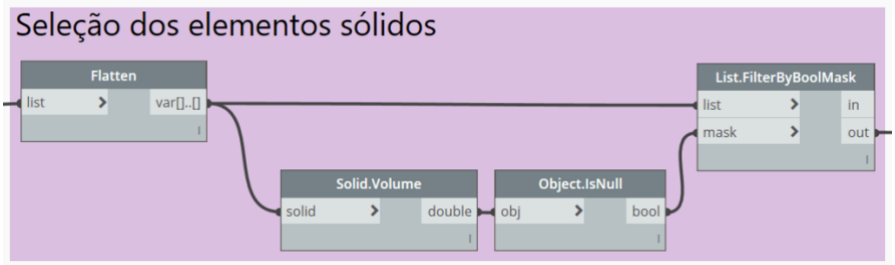


Figura 133 – Seleção dos elementos sólidos.

Relativamente à criação do volume de seleção, inicia-se o processo pela importação da *scope box* correspondente, que uma vez mais pode ser executado a partir do nó "*Select Model Elements*" ou como exemplificado na Figura 134, a partir da importação da categoria e dos respetivos elementos. Para o segundo caso, adicionou-se um nó que permite optar pela *scope box* a partir da lista completa, fornecendo apenas o índice da mesma em "*Index da Scope Box pretendida"*. Com o auxílio da seleção do índice e da listagem de todas as *scope boxes* do projeto, "*List.GetItemAtIndex"* seleciona o elemento pretendido. Por fim, uma vez importada a *scope box*, o Dynamo extrai a sua geometria através de "*Element.Geometry"*.

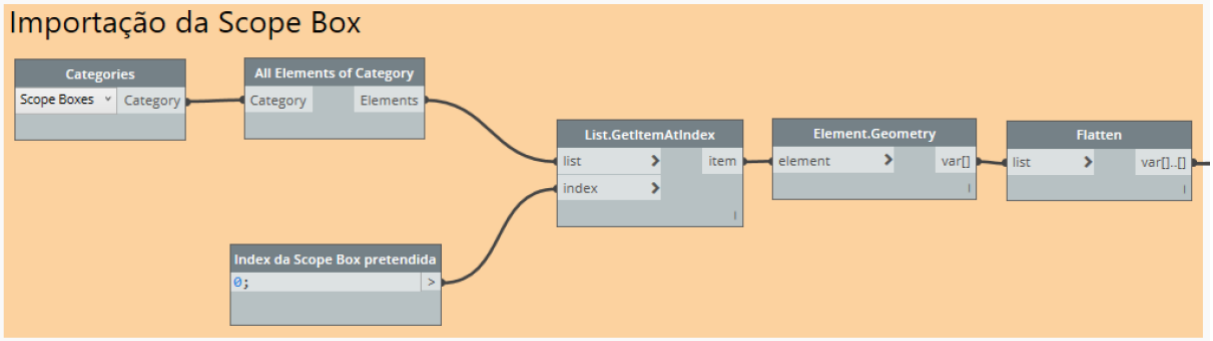


Figura 134 – Importação da *Scope Box*.

Após a seleção da geometria correspondente à *scope box* em causa, que de acordo com o documento principal se encontra sobre a forma de linhas e pontos, é selecionada a primeira e a última linha listadas na geometria, que correspondem a lados opostos da *Scope Box*, a partir de "*List.FirstItem*" e "*List.LastItem*".

De seguida, é selecionado o ponto inicial de cada uma das linhas com recurso a "*Line3d.StartPoint*", que retira o ponto inicial de uma linha num referencial tridimensional (X,Y,Z). Uma vez obtidos os pontos opostos da geometria, "*Cuboid.ByCorners*" gera um paralelepípedo maciço coincidente com a *Scope Box* em utilização (Figura 135).

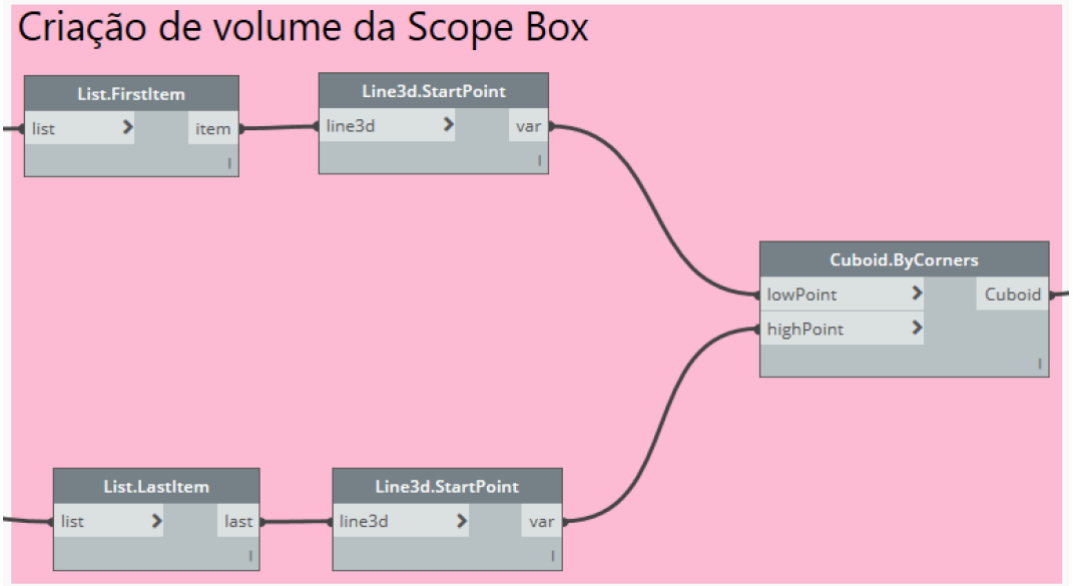


Figura 135 – Criação de volume de seleção.

De modo semelhante aos processos anteriores e de acordo com a Figura 136, é intersectada a geometria do modelo com a do volume de seleção e selecionados os respetivos elementos sólidos resultantes.

Por último, o modelo é fundido numa só peça a partir de "*Solid.ByUnion*".

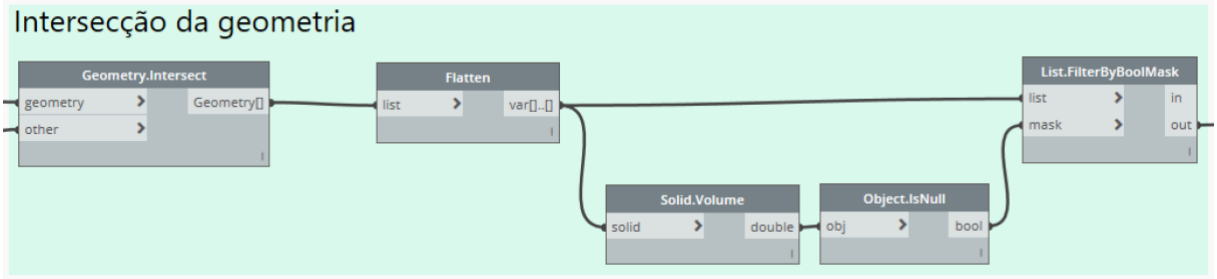


Figura 136 – Intersecção da *scope box* com a geometria do modelo.

1.3.3.1. Seleção Inversa

No que diz respeito aos restantes casos estudados no documento principal, estes implicam algumas adaptações do *Script* original. Relativamente ao processo de seleção oposta à original, este apenas implica a adição de um nó no final do processo (Figura 137).

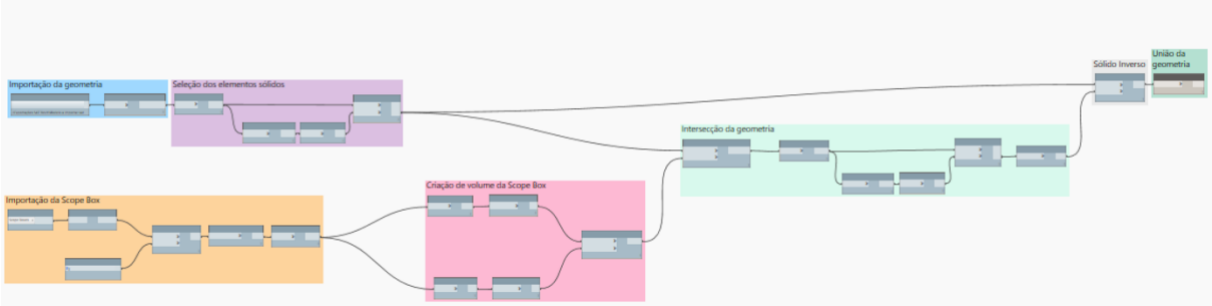


Figura 137 – Panorama geral de importação de sólido inverso à seleção de *Scope Box*.

Com recurso à utilização de *"Solid.Difference"*, demonstrado na Figura 138, é feita uma operação de remoção do modelo obtido no processo anterior relativamente ao modelo original. Deste modo, resulta um modelo com seleção inversa do modelo obtido no *script* original. Após a execução da remoção do sólido, este deverá ser novamente fundido numa peça só.

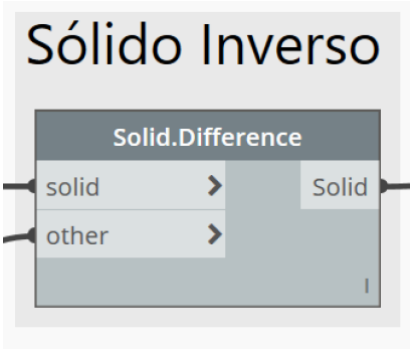


Figura 138 – Remoção do volume correspondente à seleção da *Scope Box*.

1.3.3.2. Seleção de várias *scope boxes*

Para o caso da seleção de várias *scope boxes*, o processo não sofre alterações no seguimento das fases, apenas sofre uma alteração na sua constituição (Figura 140).

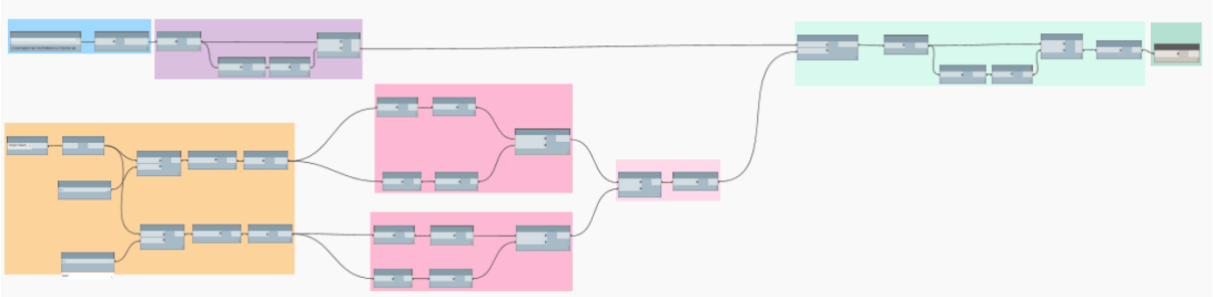


Figura 139 – Panorama geral do *script* de seleção de várias *scope boxes*.

Para a importação do modelo, é criada uma segunda opção de seleção, que permite ao utilizador escolher uma segunda *scope box*. No caso de se pretender mais do que duas *scope boxes*, o processo deverá ser replicado o número de vezes correspondente (Figura 140).

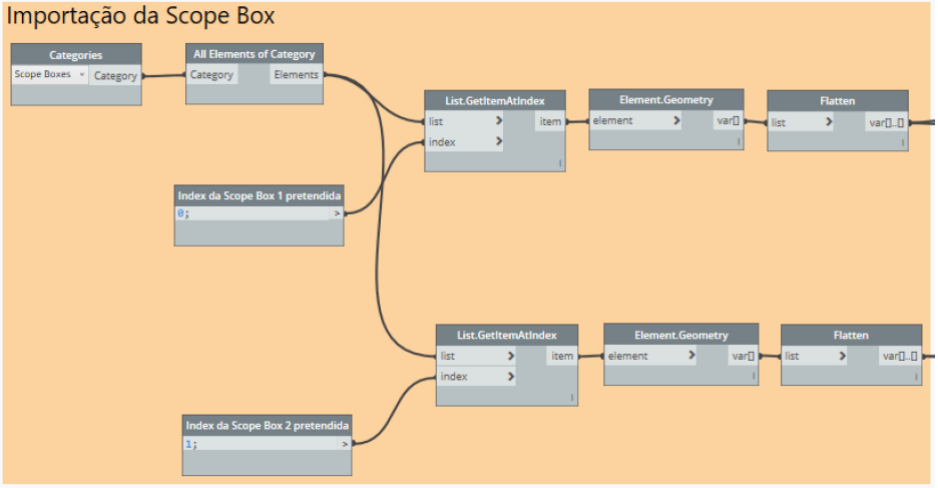


Figura 140 – Importação das várias *Scope Boxes*.

Para a criação do volume, o processo multiplica-se também pelo número de *Scope Box* selecionadas (Figura 141).

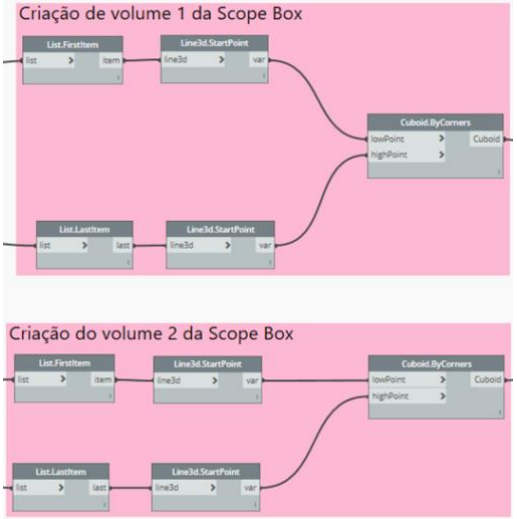


Figura 141 – Criação dos vários volumes de seleção.

Após a criação de todos os volumes de seleção, estes apenas necessitam de serem fundidos num sólido apenas, com recurso de "*Solid.Union*" e de "*Solid.ByUnion*", representados na Figura 142. A partir deste ponto, o *script* desenrola-se do mesmo modo do original.

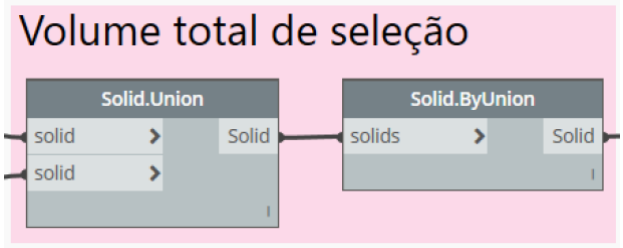


Figura 142 – Fusão dos vários volumes num volume apenas.

1.3.4. Por Caixa

A divisão por caixa é um método de divisão geométrica. O processo encontra-se dividido em cinco fases (Figura 143), o da importação do modelo, o da definição da caixa de seleção, o da criação da caixa propriamente dita, execução da sua intersecção e seleção do tipo de seleção.

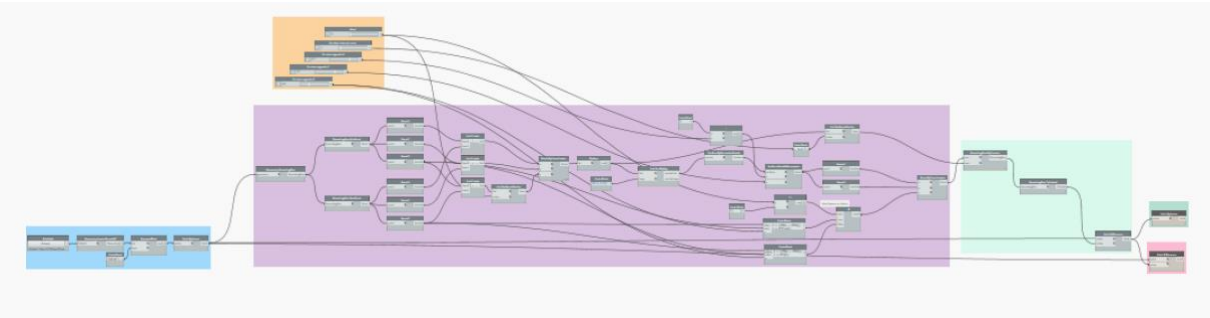


Figura 143 – Panorama geral do *script* da divisão do modelo por caixa.

A importação do modelo, uma vez mais pode ser processada de qualquer uma das formas exemplificadas anteriormente no anexo e no documento principal. Na imagem que se segue (Figura 144), importou-se a partir de um modelo puramente geométrico SAT, no entanto a seleção dos elementos sólidos foi processada diretamente com a ferramenta "*RemoveIfNot*", que remove todos os elementos cuja geometria não corresponda a "Solid".

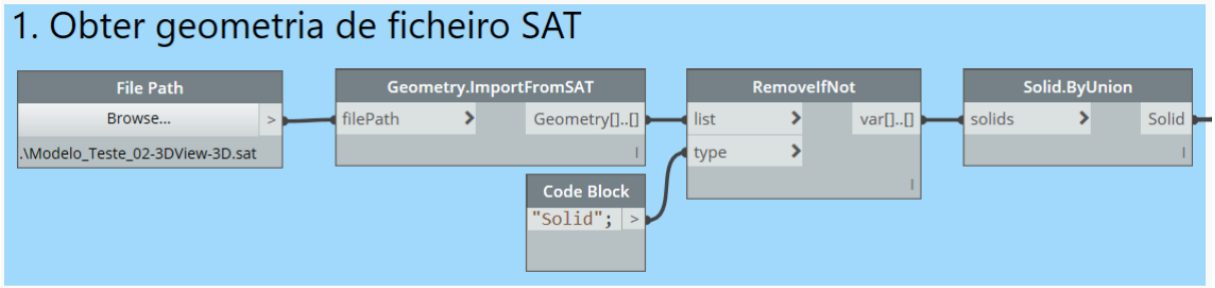


Figura 144 – Importação e seleção dos elementos sólidos do projeto remover *Solid.ByUnion*.

O segundo passo na divisão do modelo está na seleção das especificações da caixa de corte a utilizar. Seguindo a linha de raciocínio descrita no documento principal, criou-se um nó do tipo "*Number Slider*" por cada uma das especificações da caixa, demonstrado na Figura 145.

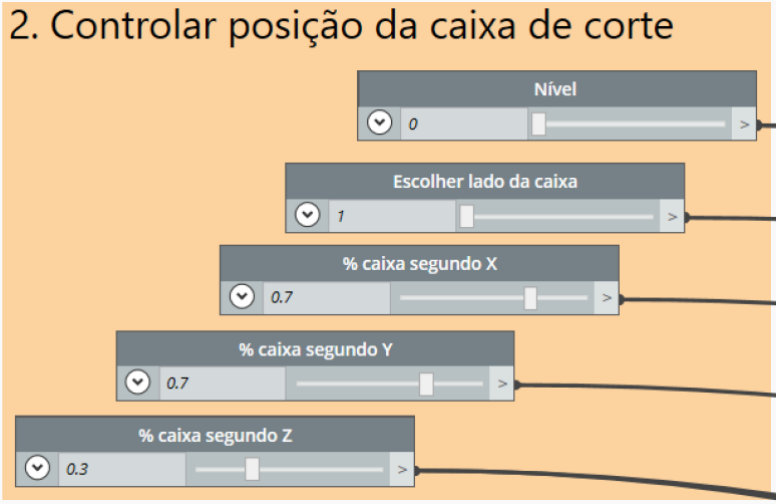


Figura 145 – Seleção das especificações da caixa de corte.

A terceira fase, descrita na imagem da Figura 146, engloba todas as etapas de criação da caixa de corte. O processo inicia-se com a criação da caixa de contorno do modelo importado. A partir da mesma, são retiradas as coordenadas do ponto mínimo e do seu oposto correspondentes a dois vértices da *bounding box*, com recurso a *"BoundingBox.MinPoint"* e "*BoundingBox.MaxPoint"*, respetivamente. Uma vez listadas as coordenadas, estas são aglomeradas conforme o seu tipo, X, Y ou Z.

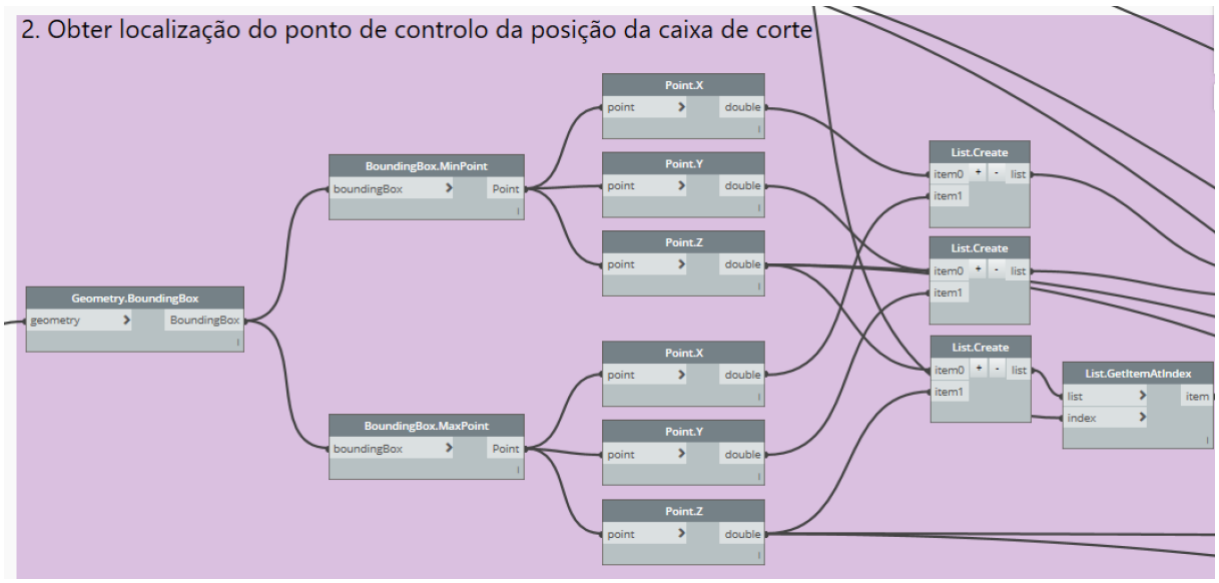


Figura 146 – Primeira etapa da criação de limites da caixa de corte.

De seguida, com "*List.SortByKey"* os vértices de uma das faces superior ou inferior são ordenados de 0 a 3. A partir desses mesmos pontos é criada uma superfície coincidente com a face escolhida (Figura 147). Com o auxílio de "*Surface.PointAtParameter"* é criada uma nova superfície de acordo com as dimensões especificadas. Em simultâneo é processada a altura da caixa, de acordo com a equação presente no "*Code Block"*, para a qual $Z = d.(1 - p)$ ou $Z = d.p$, onde d corresponde à altura real do modelo e p à fração definida pelo utilizador para as dimensões da caixa.

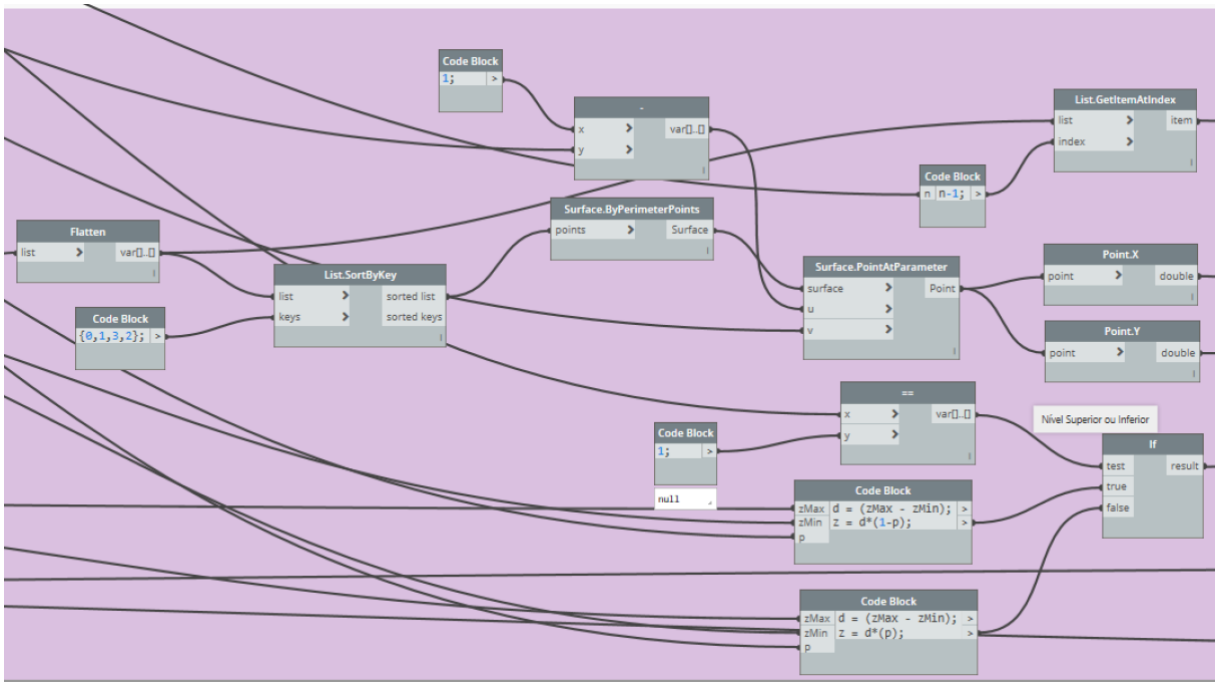


Figura 147 – Criação de limites de caixa de seleção.

Na Figura 148 é possível observar o restante percurso utilizado para a criação da caixa, executado na fase seguinte. Nela está incluído o processo de criação do ponto máximo e mínimo da caixa de corte.

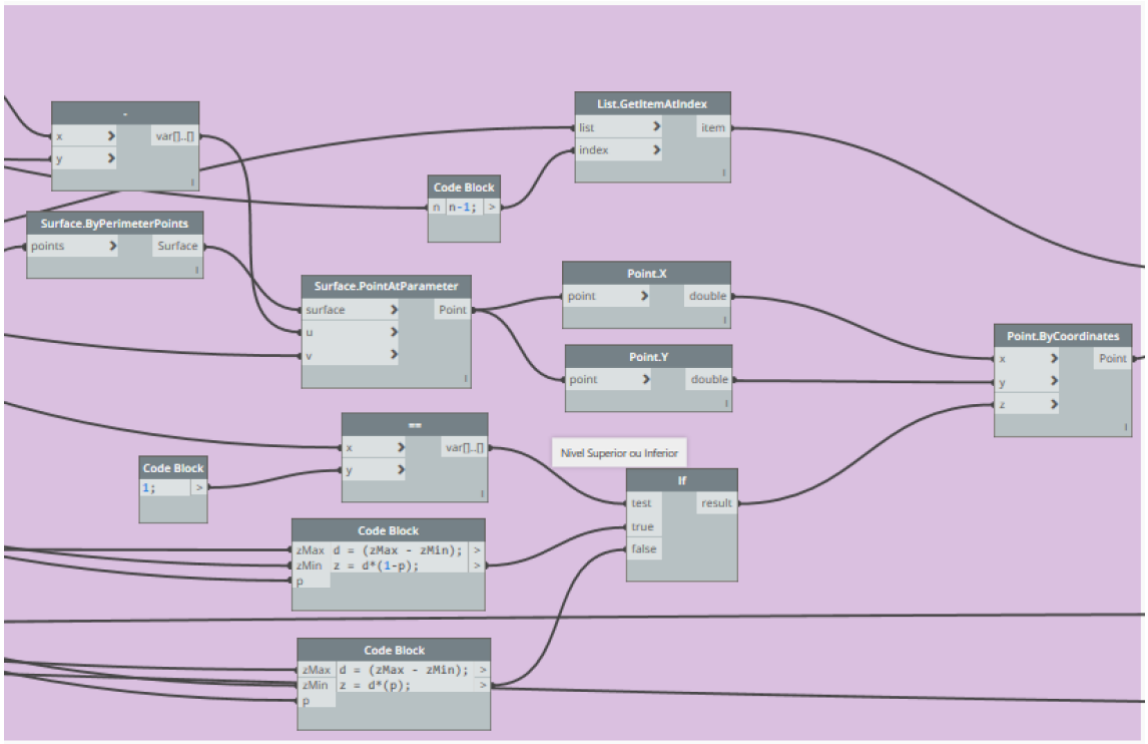


Figura 148 – Criação de limites de caixa de seleção.

Após o processo de definição dos pontos limite da caixa de corte estar concluído, procede-se à criação da mesma Figura 149. A partir de "*BoundingBox.ByCorners*" e posteriormente "*BoundingBox.To.Cuboid*" é criada a caixa de corte pretendida.

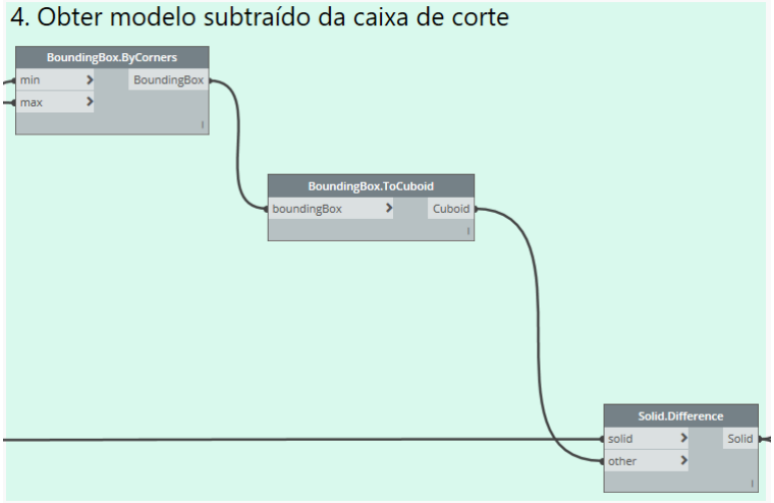


Figura 149 – Criação de caixa de corte.

Finalmente, o processo finaliza-se com a intersecção ou remoção da intersecção (Figura 150) com o modelo original, num processo semelhante aos casos referidos nos processos anteriores. Os processos devem finalizar-se com a fusão dos elementos resultantes.

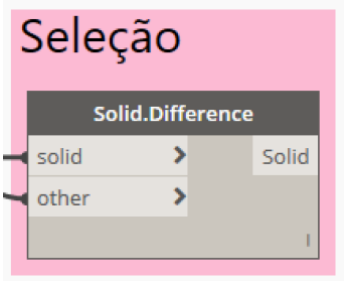


Figura 150 – Exemplo de ferramenta de remoção da caixa de seleção

1.4. Adição de Fixadores

1.4.1. Adição de Fixadores Manualmente

A complexidade de uma geometria ou a sua inconsistência podem levar ao utilizador optar pela colocação manual de fixadores. O *script* dimensionado para esta tarefa (Figura 151) visa a gestão do volume de aberturas e a criação das mesmas no modelo dividido de modo automático.

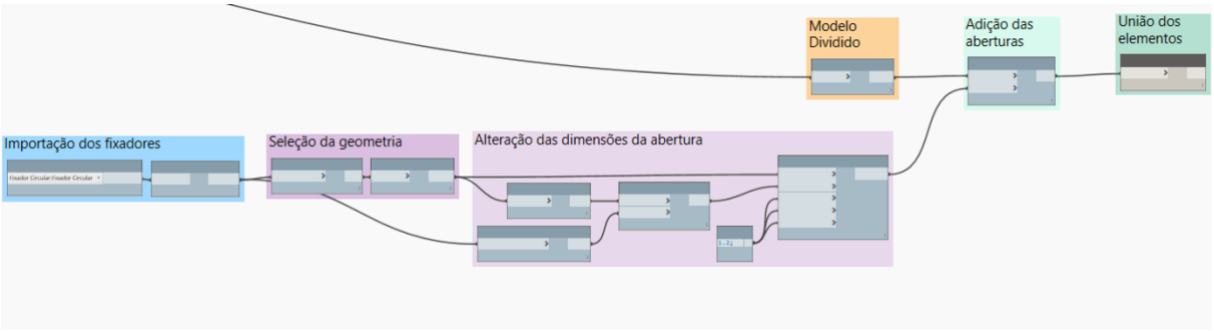


Figura 151 – Panorama geral do *script*.

O processo inicia-se com a importação dos fixadores utilizados na divisão. No exemplo seguinte (Figura 152) esta processa-se pela seleção da família e pela totalidade dos seus elementos presentes no projeto. No entanto, vários outros métodos podem ser utilizados nesta fase.

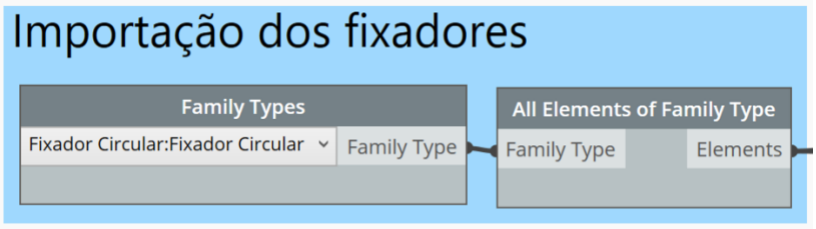


Figura 152 – Exemplo de importação dos elementos.

De seguida, é então selecionada a geometria dos mesmos, recorrendo a "*Element.Geometry*". Uma vez que os elementos selecionados são previamente criados pelo utilizador, deverão sempre apresentar uma forma geométrica sólida, pelo que no exemplo da Figura 153 não se aplicou nenhuma seleção de elementos sólidos.

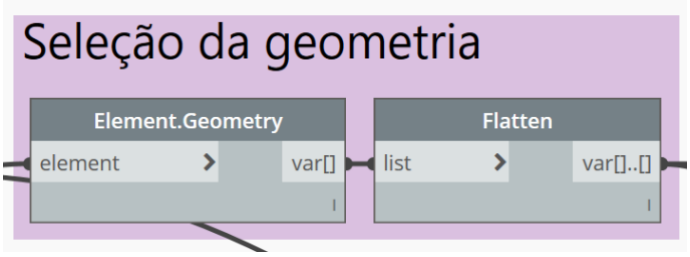


Figura 153 – Seleção da geometria dos fixadores.

A partir dos dados obtidos nos dois passos anteriores, são retirados os pontos centrais de cada fixador e o respetivo vetor de orientação da base de colocação (Figura 154). Ligando o ponto central e o vetor da orientação, é criado o plano de redimensionamento do fixador, que deverá ser paralelo ao da base do

mesmo. Com recurso a "*Geometry.Scale*" é ajustado o volume do fixador conforme o valor colocado no "*Code Block*". Os valores colocados neste ponto têm obrigatoriamente de ser maiores ou iguais a 1.

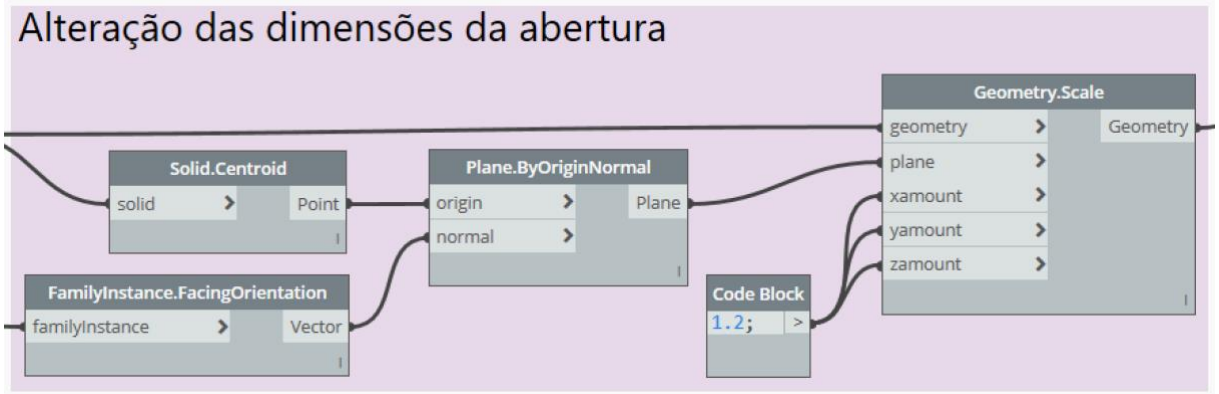


Figura 154 – Processo de redimensionamento dos fixadores.

Por fim, prossegue-se para a remoção dos volumes dimensionados no ponto anterior. Através de "*Solid.DifferenceAll*", o Dynamo remove individualmente cada um dos volumes das aberturas ao sólido gerado para a divisão do modelo pretendida (Figura 155). Conforme os restantes *scripts*, deverá ser sempre processada a função "*Solid.ByUnion*".

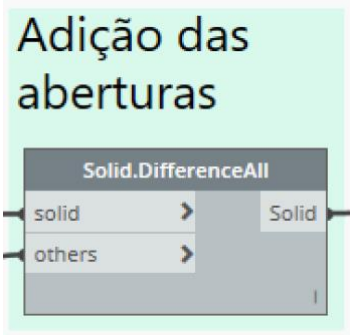


Figura 155 – Operação de remoção dos volumes das aberturas.

1.4.2. Adição de Fixadores Automaticamente

A adição de estruturas de fixação implica a especificação do elemento a utilizar como fixador, a definição de um elemento base para a sua colocação e a automatização da adição das estruturas de fixação e das respetivas aberturas.

O processo utilizado no *script* seguinte (Figura 156) está dividido em duas partes, a criação de um modelo dividido por nível e a aplicação de fixadores e das aberturas.

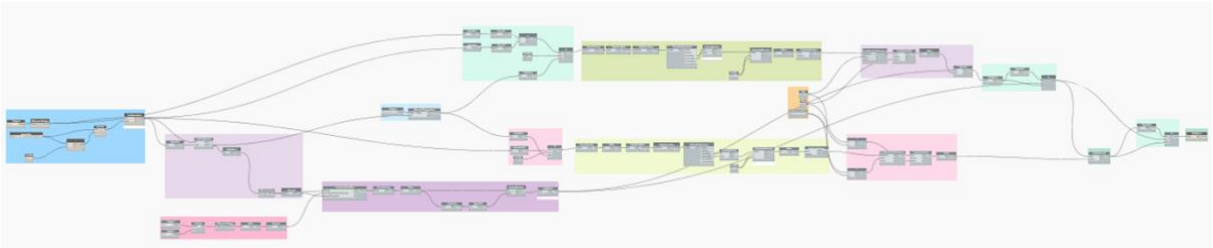


Figura 156 – Panorama geral do *script*.

O primeiro passo do *script* envolve a definição do nível superior do modelo a dividir e listagem do mesmo juntamente com o nível imediatamente abaixo ou a especificar, tal como é possivel visualizar na imagem da Figura 157. Através de um procedimento já utilizado noutros *scripts*, é importada a lista de todos os níveis presentes no projeto. Com recurso à utilização de um "*Number Slider*" é escolhido o número correspondente ao índice do nível pretendido. Este é então listado juntamente com o piso imediatamente abaixo a partir de uma operação de subtração do seu índice por uma unidade, podendo ser definido outro qualquer valor para a escolha de outro nível.

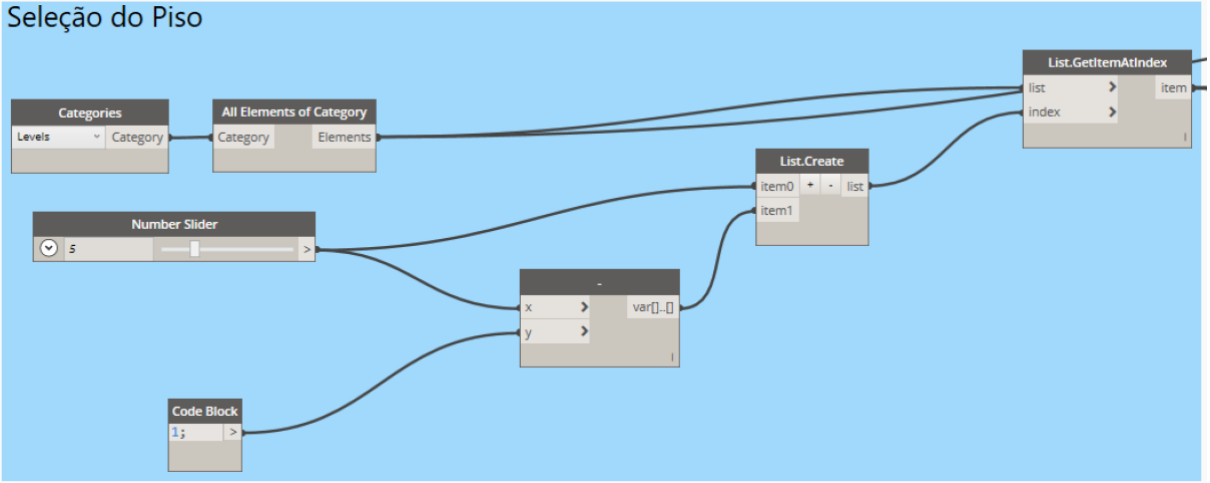


Figura 157 – Listagem do piso a dividir.

Uma vez definidos os pisos a dividir, o processo de divisão desenrola-se de modo similar ao método de divisão por piso. No entanto, de modo a evitar que o processo pare devido à presença de um nível inexistente no projeto, adicionou-se um processo de verificação de presença de elementos nulos (Figura 158). Deste modo, na eventualidade do utilizador selecionar o primeiro ou último piso do projeto, o processo irá continuar sem que Dynamo resulte em erro.

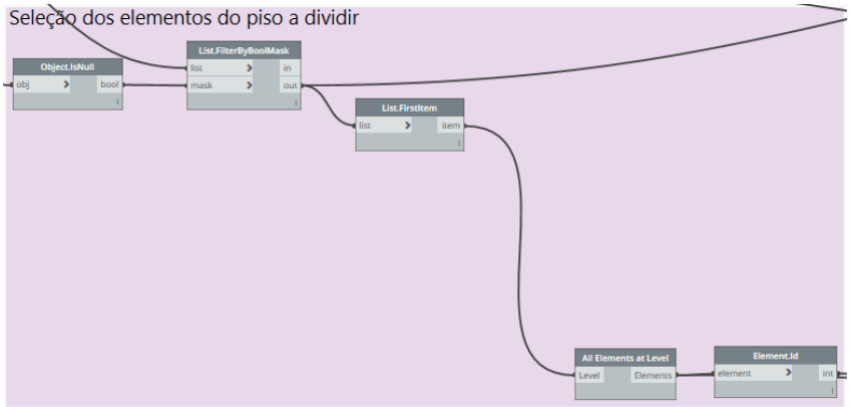


Figura 158 – Verificação da lista de divisão.

Neste processo deverão também ser listados os elementos a remover do projeto, que não possam ser removidos na fase de seleção dos elementos. O seu funcionamento, demonstrado na Figura 159, é semelhante ao utilizado na divisão por piso, com o reconhecimento dos números de identificação dos elementos.

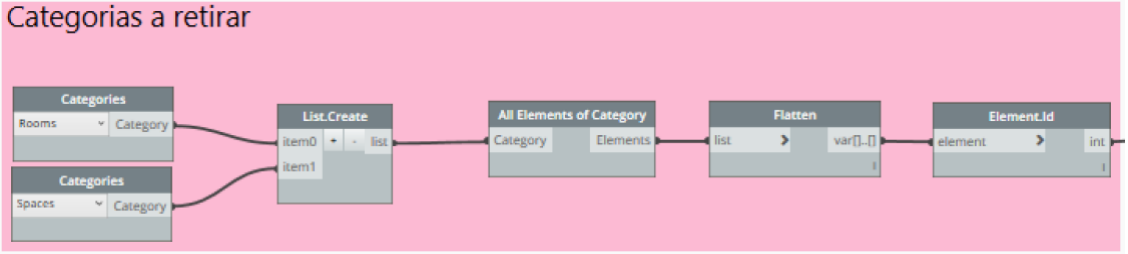


Figura 159 – Seleção de categorias a não incluir na divisão.

Analogamente, os elementos são verificados, e a partir da lista final, é extraída a sua geometria e retirado todo o elemento sem volume presente na seleção (Figura 160).

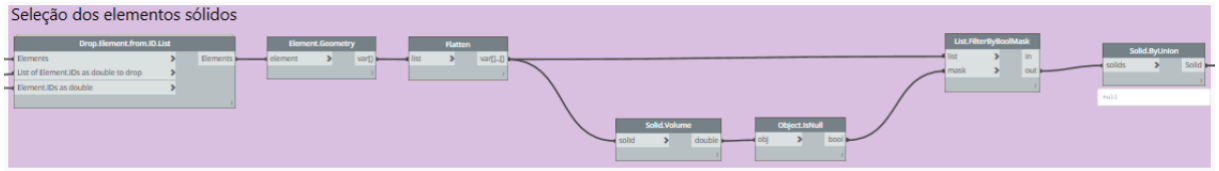


Figura 160 – Seleção dos elementos a incluir e dos respetivos elementos sólidos.

De seguida, inicia-se a criação das estruturas de fixação, nomeadamente pela escolha dos elementos base para a sua colocação (Figura 161). Com a seleção da categoria correspondente, e com "*AllElementsOfCategoryAtLevel*" são triados todos os elementos especificados para os dois pisos escolhidos.

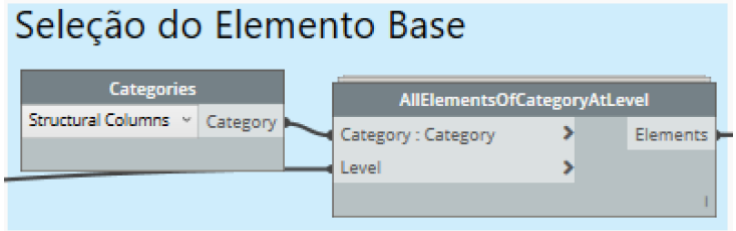


Figura 161 – Seleção dos elementos base para a colocação de fixadores/aberturas.

De modo a evitar qualquer tipo de erro, colocou-se uma verificação de último piso para a eventualidade de haver uma lista com apenas um piso que pudesse causar a repetição do mesmo e colocasse as aberturas e as estruturas de fixação sobre o mesmo local, e como resultado se anulassem (Figura 162). Assim, ao comparar o ID do primeiro nível com o último da lista, irá parar o processo caso estes coincidam.

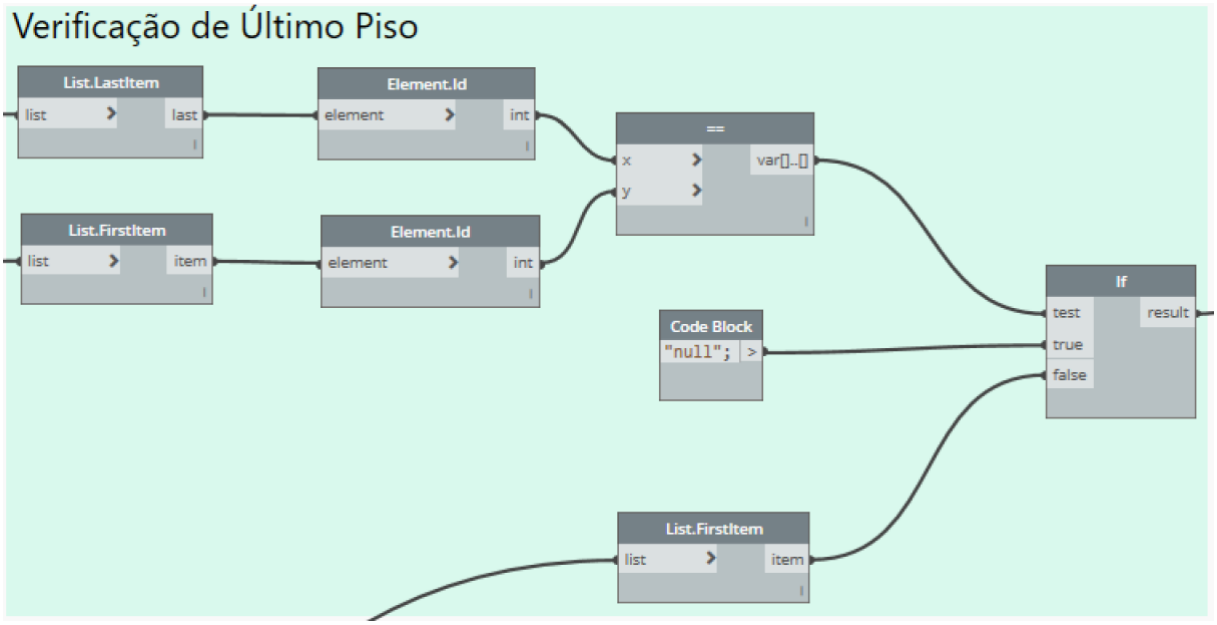


Figura 162 – Verificação de último nível.

Para o primeiro piso adicionou-se igualmente uma verificação, que deteta um elemento nulo na lista de pisos selecionados (Figura 163). Caso se verifique a presença de um piso nulo, o processo irá ser interrompido com a mensagem "*Null*".

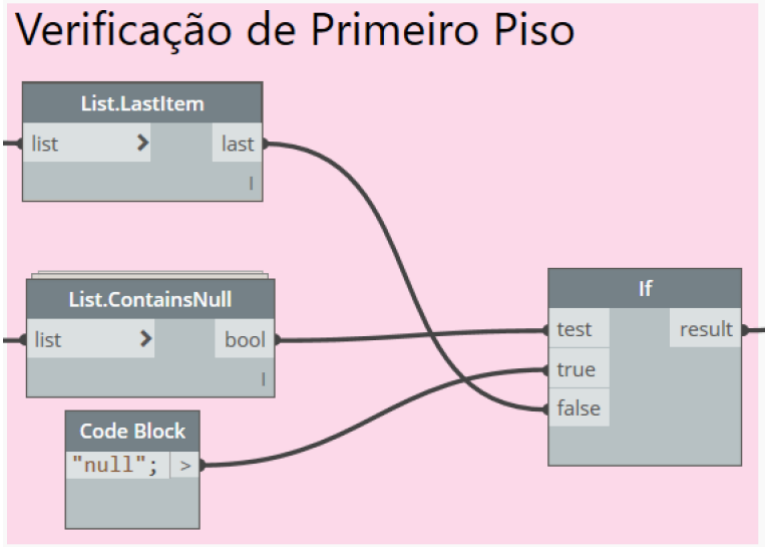


Figura 163 – Verificação de primeiro nível.

A preparação da base de colocação do fixador ou da abertura, parte da posição da face superior do pilar. Deste modo, a geometria de cada pilar é convertida nas suas faces com "*PolySurface.BySolid*" e estas de seguida separadas por "*PolySurface.Surfaces*". Após obtidas todas as faces de cada pilar, o Dynamo seleciona apenas as que estão orientadas na vertical para cima, com recurso ao nó "*Surface.FilterByOrientation*". Uma vez encontrada a face pretendida, é determinado o seu ponto central, a partir do qual se colocará as estruturas correspondentes. Este passo encontra-se demonstrado na Figura 164 e detalhado na Figura 165 e na Figura 166.

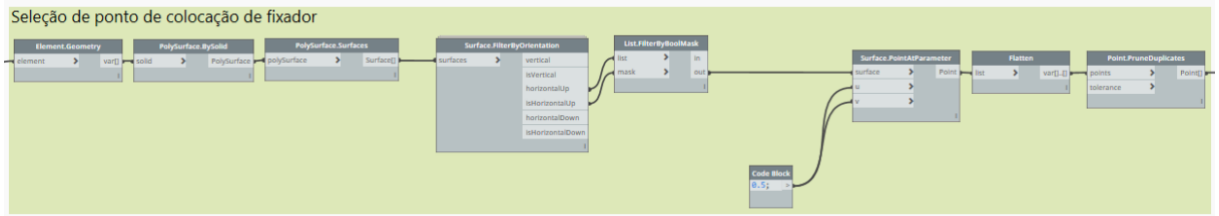


Figura 164 – Processo de determinação do ponto base de colocação de fixadores/aberturas.

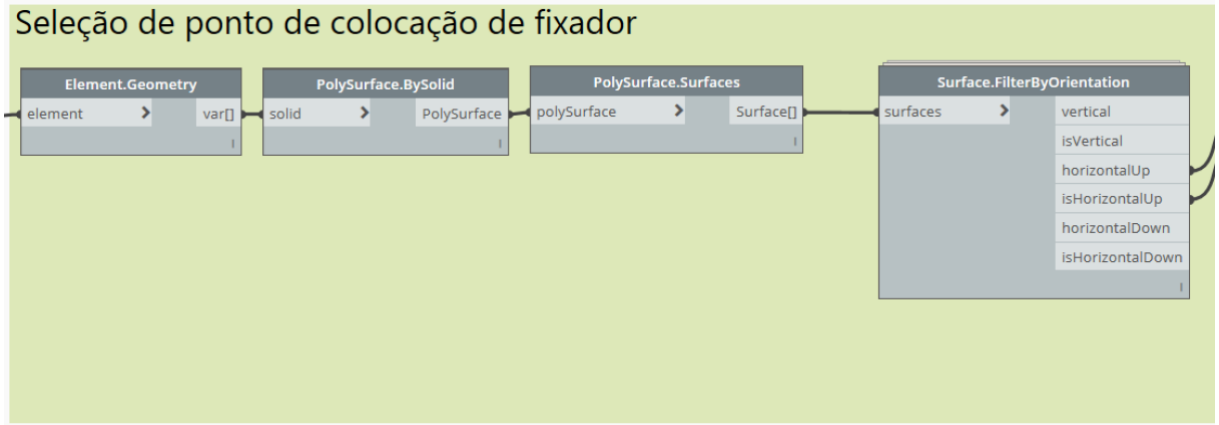


Figura 165 - Processo de determinação do ponto base de colocação de fixadores/aberturas (Parte 1).

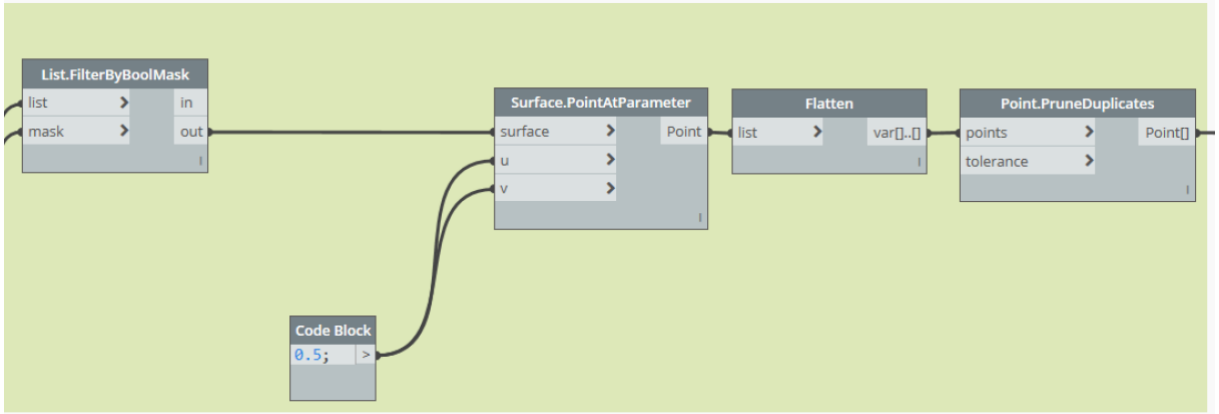


Figura 166 - Processo de determinação do ponto base de colocação de fixadores/aberturas (Parte 2).

A colocação de estruturas de fixação parametrizadas no Dynamo implica a definição de cada uma das medidas. Na Figura 167 está demonstrado o processo manual, no entanto é possível automatizar o processo de dimensionamento, como fazendo variar de acordo com as dimensões do pilar ou do modelo no geral. É ainda especificado um rácio entre as dimensões a utilizar no fixador e na respetiva abertura, devendo a última ser sempre superior ou igual ao primeiro.

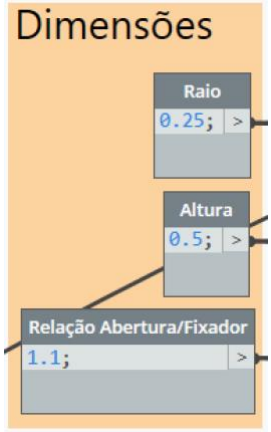


Figura 167 – Medidas do fixador parametrizado no Revit.

Com o ponto base e com as dimensões relativas à secção das estruturas, é criado a secção horizontal da mesma. Esta é então extrudida com "*Curve.ExtrudeAsSolid*", formando a geometria pensada, tal como demonstrado no *script* da Figura 168.

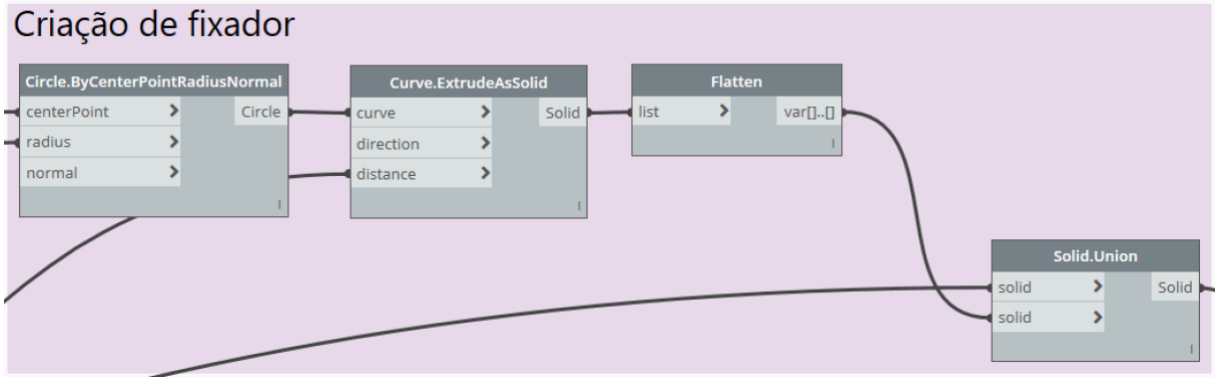


Figura 168 – Criação de fixador parametrizado no Revit.

No caso das estruturas de fixação é feita uma nova verificação à criação da mesma, no caso de a criação dos mesmos ter sido concluida com exito, o modelo deverá ser unido e passar à fase seguinte (Figura 169). No caso de não existir a necessidade de utilização de fixadores, o modelo será considerado nulo, o processo continuará com o modelo do piso escolhido, sem os fixadores.

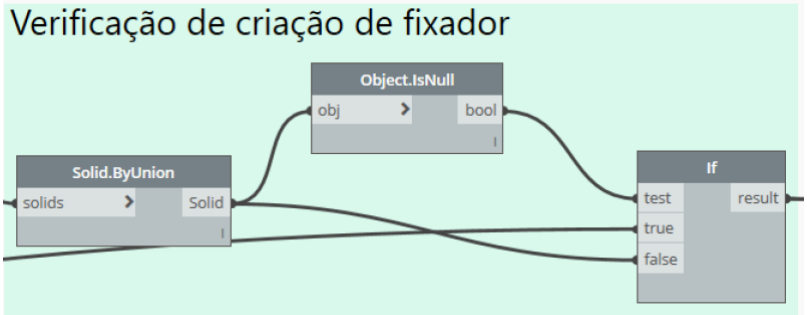


Figura 169 – Verificação de presença de fixadores no modelo dividido.

Em simultâneo, é criado o modelo com as aberturas, que resulta de uma simples operação de subtração de sólidos "*Solid.DifferenceAll*". O modelo resultante da verificação de criação de fixador é então subtraído pelos volumes das aberturas (Figura 170).

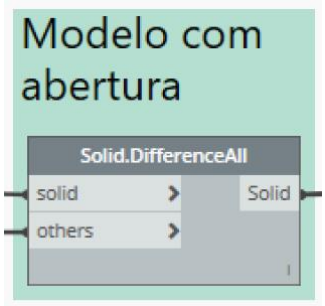


Figura 170 – Ferramenta de subtração utilizada para a criação de aberturas.

Analogamente, após a adição das aberturas é realizada uma verificação da existência das mesmas, num método igual ao utilizado para os fixadores (Figura 171). O modelo resultante desta verificação será então unido tal como referido nos *scripts* anteriores, com recurso à utilização de "*Solid.ByUnion*".

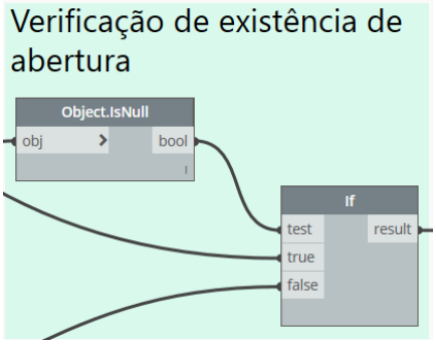


Figura 171 – Verificação da colocação das aberturas no modelo dividido.